

**TESIS DOCTORAL**

**MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS EDIFICIOS DE USO EDUCATIVO EN CLIMA MEDITERRÁNEO:**

**Aplicación práctica de diseño y cálculo de Sistemas de Ventilación Natural**

Sevilla, 2020

**MARIA TERESA GIL BÁEZ**

**DIRECTORAS**

**DRA. ÁNGELA BARRIOS PADURA**

**DRA. MARTA MOLINA HUELVA**







**María Teresa Gil Báez**

**MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS EDIFICIOS DE  
USO EDUCATIVO EN CLIMA MEDITERRÁNEO:  
Aplicación práctica de diseño y cálculo de Sistemas  
de Ventilación Natural**

**Tesis Doctoral**

**Dirigida por:**

**Dra. Ángela Barrios Padura**

**Dra. Marta Molina Huelva**



**Sevilla, febrero de 2020**



Autora de la tesis:

María Teresa Gil Báez

Arquitecto

Directoras:

Dra. Ángela Barrios Padura

Dra. Marta Molina Huelva

Tutora:

Dra. Ángela Barrios Padura

Programa de doctorado en Arquitectura

Línea de investigación: LE-3. Tecnología y materiales de construcción. Construcción sostenible

Departamento: Construcciones Arquitectónicas I

Fecha de entrega:

21 de febrero de 2020



A mis hijos

"Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs."

The Report of the U.N. Brundtland Commission, Our Common Future, 1987

## Resumen

Los sistemas de ventilación natural se identifican como herramientas de diseño bioclimático que pueden formar parte de un conjunto de soluciones para mejorar la sostenibilidad de los edificios. Permiten reducir el consumo de energía asociado a los sistemas de ventilación mecánica y a los sistemas de refrigeración, formando parte del conjunto de estrategias a utilizar en el diseño de edificios de consumo casi nulo.

La normativa y la reglamentación técnica actuales establecen parámetros de diseño de los edificios para incrementar su hermeticidad al aire con el fin de reducir las pérdidas de energía y mejorar su eficiencia energética. Un exceso de hermeticidad, produce una menor renovación del aire interior, lo que lleva a un incremento de los contaminantes con el consecuente riesgo de un empeoramiento de la calidad del aire. Como consecuencia de esto, se obtienen edificios sin infiltraciones de aire, a los que hay que proporcionar “conscientemente” una ventilación que antes era “espontánea”.

La normativa española, en el marco del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, desarrolla soluciones basadas en instalaciones mecánicas de ventilación para los edificios de uso no residencial, entre los que se encuentran los edificios escolares. Pero estas instalaciones consumen energía, por lo que para minimizar este impacto, la norma regula la utilización de dispositivos de “recuperación de calor”, que también consumen energía. En última instancia, estas instalaciones mecánicas presentan importantes inconvenientes relacionados con la salubridad. Sumado a lo anterior, en ocasiones la relación coste-eficacia de estos sistemas mecánicos no es equilibrada, mostrándose cuestionable su utilización generalizada para todo tipo de edificio.

En este contexto se hace necesaria la realización de estudios que proporcionen alternativas a las instalaciones de ventilación mecánica, de modo que se pueda garantizar la salubridad de un modo más sostenible, perfilándose los sistemas de ventilación natural como estas alternativas factibles viables y sostenibles. Sin embargo, estos sistemas de ventilación natural no se encuentran desarrollados en la normativa española para que puedan ser accesibles a los proyectistas, arquitectos e ingenieros que intervienen en el proceso constructivo.

Esta tesis doctoral se centra en mostrar los sistemas de ventilación natural como recursos actuales, viables y factibles para la mejora de la sostenibilidad de los edificios en clima mediterráneo, utilizando como tipología de estudio los edificios de uso educativo. Para ello se desarrolla el diseño y cálculo de un sistema de ventilación natural con el objeto de garantizar la calidad del aire interior en las aulas, el cual se implementa posteriormente de manera experimental en un edificio escolar de nueva construcción, que servirá de test para validar el diseño teórico. El objetivo último es demostrar la viabilidad de este tipo de sistemas como recursos que formen parte del conjunto de estrategias pasivas que se puedan utilizar para mejorar la sostenibilidad de los centros educativos en clima mediterráneo.

El sistema se estudia inicialmente para garantizar la calidad del aire interior en las aulas y espacios de alta densidad de ocupación con un muy bajo o nulo consumo de energía. Estos sistemas proporcionan como prestación adicional la posible reducción de la demanda de refrigeración, si se utilizan como sistema de refrigeración pasiva, colaborando en la reducción del tamaño de los equipos y del consumo eléctrico asociado. Con ambas acciones es posible reducir la emisión de CO<sub>2</sub> del edificio en su funcionamiento, incrementándose de este modo su sostenibilidad a lo largo de su vida útil. También presentan otras ventajas como la reducción de los costes de inversión inicial y de mantenimiento y la mejora de la salubridad de los espacios.

El diseño del sistema parte del análisis de experiencias reales existentes en edificios construidos en las últimas décadas del siglo XX en diversas localizaciones de Europa y Estados Unidos y en ejemplos de la arquitectura escolar tradicional en Andalucía, en los que cada aula se ventilaba con estrategias pasivas de ventilación natural, basadas en la combinación de estrategias de ventilación cruzada y efecto chimenea.

Estos diseños se recuperan y se analizan desde el prisma de la tecnología y el conocimiento actuales y con los medios disponibles hoy día (software de cálculo, equipos de medida y monitorización, etc...). El dimensionamiento

del sistema se realiza utilizando un programa de cálculo termodinámico y de fluidos computacional (CFD) con el que se realizan diferentes simulaciones de un edificio escolar prototipo, que se utiliza como modelo. Posteriormente ambos sistemas de ventilación natural y mecánica se implementan en un edificio de nueva planta que se utiliza de edificio demostrador sobre el que se realizan mediciones, analizando comparativamente ambas soluciones para validar el sistema.

El ámbito climático de estudio en el que se enmarca la investigación es la región de Andalucía, en el sur de España, como representativa del clima Mediterráneo europeo.

Entre las conclusiones a las que se llega destaca la posibilidad de obtener resultados adecuados de calidad del aire interior de los espacios escolares sin consumo energético. A su vez, como principal conclusión se confirma la viabilidad de utilización de los sistemas de ventilación natural como sistemas pasivos para obtener una adecuada calidad del aire y confort en el interior los edificios, mejorando su sostenibilidad a corto, medio y largo plazo, al reducir el consumo de energía, así como la salubridad de los espacios al minimizar los riesgos derivados de la falta de mantenimiento de los sistemas mecánicos de ventilación. De este modo, se muestra cómo estos sistemas constituyen una oportunidad a considerar en el diseño de edificios de uso docente de consumo casi nulo. Así mismo, las conclusiones del presente trabajo se pueden extrapolar y adecuar al diseño de otro tipo de edificios de uso terciario tales como comercial, administrativo, residencial... etc.



## **Índice General**

<b>Introducción</b>	<b>13</b>
<b>Lista de abreviaturas</b>	<b>23</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>25</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>27</b>
<b>Índice detallado</b>	<b>30</b>
<b>CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>34</b>
<b>CAPÍTULO 2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS</b>	<b>118</b>
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA</b>	<b>128</b>
<b>CAPÍTULO 4. LA ARQUITECTURA ESCOLAR EN ANDALUCÍA</b>	<b>138</b>
<b>CAPÍTULO 5. MODELO DE CÁLCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA</b>	<b>194</b>
<b>CAPÍTULO 6. CASO DE ESTUDIO</b>	<b>254</b>
<b>CAPÍTULO 7. RESULTADOS</b>	<b>288</b>
<b>CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES</b>	<b>303</b>
<b>CAPÍTULO 9. TRANSFERENCIA DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>311</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>319</b>



## Prólogo

El origen de esta tesis doctoral se encuentra en la búsqueda de una respuesta a una necesidad identificada en el funcionamiento habitual de los edificios escolares. A su vez, el proceso de investigación desarrollado abarca un ámbito temporal más amplio que el de la propia tesis. Ya en la solicitud de ingreso en el programa de doctorado mencionaba mi desempeño profesional en los últimos 15 años en el ámbito de las infraestructuras educativas, durante los cuales he coordinado diversos estudios técnicos encaminados a la mejor integración de la normativa técnica en el diseño y operación de los edificios educativos. Planteaba así la necesidad de profundizar en determinados resultados obtenidos, al igual que la oportunidad de darles difusión en un marco científico, enmarcado todo ello en el ámbito de la sostenibilidad y la mejora de la eficiencia energética. Mencionaba también la enorme importancia de las condiciones espacio-ambientales en el desempeño académico, así como el interés de la transferencia de conocimiento de los resultados de la investigación y la relación ciencia-ciudadanía, dado que los datos y situaciones edificatorias de la investigación partirían del ámbito docente y en el sentido inverso, los resultados y conclusiones de la investigación repercutirían en la mejora de las condiciones espacio-ambientales de este tipo de edificios.

Durante estos 4 cursos académicos se ha desarrollado la investigación que se expone en la presente tesis doctoral, cumpliéndose los objetivos planteados inicialmente, profundizándose en la cuestión de la sostenibilidad desde el enfoque concreto de determinadas soluciones que garantizan la calidad del aire interior y las condiciones de salubridad en los edificios escolares, reduciendo el consumo de energía y mejorando su eficiencia.

El objetivo de la difusión de resultados y la transferencia de conocimiento se ha alcanzado con 7 comunicaciones en congresos, 5 publicaciones como autor principal y 3 como autor no principal y la participación en 1 proyecto de investigación del ámbito Interreg Sudo. Así mismo, los resultados obtenidos en esta tesis doctoral se ofrecerán para ser utilizados y desarrollados para su inclusión en la norma sectorial de las infraestructuras educativas.



## **\_INTRODUCCIÓN**

**MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS EDIFICIOS DE USO EDUCATIVO EN CLIMA MEDITERRÁNEO:  
Aplicación práctica de diseño y cálculo de Sistemas de Ventilación Natural**



La reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al consumo de energía con la finalidad de mitigar los efectos del cambio climático, es un objetivo presente en las directrices comunitarias de la Unión Europea, siendo objetivos clave para 2020 la reducción del 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a 1990, que el 20% del consumo total de energía sea procedente de energías renovables y un incremento del 20% de la eficiencia energética (“Unión Europea. Acción por el clima,” n.d.).

Entre los principales consumidores de energía, se encuentran los edificios, responsables de casi la mitad del consumo total de energía primaria (40%) (Comisión Europea, 2010, 2018; “IEA (International Energy Agency),” n.d.). Actualmente existe una intensa corriente internacional de investigación orientada a analizar la reducción de demanda y el consumo de energía del sector de la edificación. Esta cuestión se encuentra regulada normativamente a través de diversas Directivas Europeas (Comisión Europea, 2010, 2018; DOCE Diario Oficial de la Unión Europea, 2012; Europeo, Consejo, & Uni, 2003). En la actualidad, la energía consumida por los edificios está fundamentalmente ligada a su uso (Pérez-Lombard, Ortiz, & Pout, 2008). Desde la segunda mitad del siglo XX, se ha producido un incremento en su mecanización y tecnificación, utilizándose en mayor medida sistemas activos de acondicionamiento de los espacios con el objetivo de garantizar el confort interior de los ocupantes. Esta tendencia ha desplazado elementos de diseño tradicionales que permiten garantizar el confort del usuario con un mínimo o nulo uso de energía, tales como las estrategias de diseño bioclimático que consideran los recursos climáticos de la zona donde se implanta el edificio (Foruzanmehr & Vellinga, 2011; Santamouris, 2007).

Los sistemas de acondicionamiento de los espacios interiores HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning por sus siglas en inglés) se identifican como los responsables del 60-70% del consumo total de energía no industrial (Chenari, Dias Carrilho, & Gameiro da Silva, 2016; Khan, Su, & Riffat, 2008). Según la Directiva Europea DE 2018/844 relativa a la eficiencia energética en los edificios (Comisión Europea, 2018) “casi el 50% del consumo de energía final de la Unión se destina a calefacción y refrigeración, de la cual el 80% se consume en edificios. De este modo, la consecución de los objetivos de la Unión en materia de energía y cambio climático está relacionada con los esfuerzos de la Unión para renovar su parque inmobiliario priorizando la eficiencia energética, aplicando el principio «primero, la eficiencia energética» y estudiando el despliegue de las energías renovables”. En la Unión Europea (UE) había alrededor de 196 millones de viviendas en 2004, de las que el 50% aproximadamente fueron construidas antes de 1970 y alrededor de un tercio entre 1970 y 1990 (Casquero-Modrego & Goñi-Modrego, 2018), por lo que las acciones a llevar a cabo se pueden centrar tanto en el diseño de nuevos edificios, como en la rehabilitación de los existentes, presentando en su renovación la oportunidad para obtener una efectiva reducción de la demanda de energía.

Por un lado, la reducción del tamaño y el consumo de los sistemas activos de acondicionamiento interior se presentan como una importante oportunidad de reducir el impacto en el consumo de energía a nivel mundial (Rana, Kusy, Wall, & Hu, 2015). Por otro lado debe también tenerse en cuenta que un edificio diseñado y construido de modo sostenible reduce al mínimo el consumo de energía entre otras cuestiones (uso de agua, materias primas, suelo...) a lo largo de su ciclo de vida completo. Actualmente existen diversos métodos de evaluación de la sostenibilidad en los edificios: LEED en los Estados Unidos (EEUU). (Gil-Baez, Barrios-Padura, Molina-Huelva, & Chacartegui, 2017), BREEAM en el Reino Unido (“BREEAM,” n.d.), HQE (“HQE,” n.d.) en Francia y CASBEE (“CASBEE,” n.d.) en Japón.

El diseño de los edificios teniendo en cuenta el clima de la zona y las condiciones concretas del enclave, representa una excelente oportunidad para reducir la necesidad de calefacción y aire acondicionado en su uso y funcionamiento, manteniendo unas adecuadas condiciones interiores y reduciendo la demanda y por tanto el consumo de energía y los costes de operación (Givoni, 1969; Jaime Lopez de Asiain, Rafael González Sandino, José María Cabeza Láinez, Margarita de Luxán García de Diego, Flavio Celis D’Amico, Fernando da Casa Martín, Ernesto Echevarría Valiente, 1997; Olgyay, Frontado, & Clavet, 1998). Esta forma de diseñar se materializa en lo que se conocen como soluciones bioclimáticas o de diseño pasivo y se relaciona con las envolventes del edificio (fachadas y cubiertas), las protecciones solares y los vientos dominantes, de manera que el edificio pueda adaptar su funcionamiento al clima según la época del año.

En el ámbito específico del clima mediterráneo, con temperaturas suaves y un considerable número de horas de sol a lo largo del año, este tipo de diseño, utilizado tradicionalmente, representa una oportunidad para reducir los consumos energéticos de los edificios y de este modo mejorar su sostenibilidad garantizando el confort interior y la salubridad de los espacios. Este aspecto está contemplado en las DE relativas a la eficiencia energética de los edificios en todas sus versiones y actualizaciones. La DE 2010/31 de Eficiencia Energética en los Edificios (Comisión Europea, 2010), lo recoge literalmente del siguiente modo:

*“En los últimos años se ha observado un aumento del número de instalaciones de aire acondicionado en los países europeos. Esto da lugar a problemas importantes en las horas de máxima carga, aumentando el coste de la electricidad y perturbando el balance energético de esos países. Debe darse prioridad a las estrategias que mejoren el comportamiento térmico de los edificios en el verano. Con esta finalidad deben propiciarse medidas que eviten el sobrecalentamiento, tales como el sombreado y la suficiente inercia térmica en la construcción de edificios, así como perfeccionar y aplicar técnicas de enfriamiento pasivo, en particular, aquellas que mejoren las condiciones ambientales interiores y creen microclimas en el entorno de los edificios.”*

En el caso de los edificios de uso docente, la adecuada calidad del ambiente interior se relaciona con el aprendizaje (Barrett, Davies, Zhang, & Barrett, 2015) y en las aulas, debiéndose garantizar una adecuada Calidad del Aire Interior (CAI) además de otras condiciones de confort (Chatzidiakou, Mumovic, & Summerfield, 2012). Las aulas constituyen espacios de alta densidad de ocupación, en los que la CAI debe estudiarse de manera específica.

En los edificios educativos se ha realizado tradicionalmente el tratamiento térmico del aire (fundamentalmente calefacción), quedando la ventilación garantizada por las infiltraciones y una adecuada praxis en la forma de utilizar los espacios, renovando el aire mediante la apertura de puertas y ventanas en determinados momentos de la actividad diaria. Esto se da tanto en Andalucía como en otras localizaciones europeas, en clima mediterráneo y en climas más fríos. De igual manera se consideraba en la normativa vigente hasta el año 2008 (Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios) (Ministerio de Economía y Hacienda, Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, & Ministerio de Economía y Hacienda, 1998).

En la última década, los reglamentos técnicos internacionales han promovido el incremento de la estanqueidad al aire y de la hermeticidad en los edificios como medida para reducir las pérdidas de calor en invierno y por tanto de energía. Esta tendencia se deriva de estudios realizados fundamentalmente en climas fríos, en los cuales la demanda energética debida a los requisitos de calefacción es muy elevada. Sin embargo, una mayor hermeticidad puede empeorar la CAI, llevando a que se puedan producir mohos y condensaciones en el interior de los edificios así como elevados niveles de contaminantes, por lo que se hace necesario, a la vez que se aumenta ésta, regular normativamente también los niveles de ventilación necesarios para garantizar la salubridad en el interior de los espacios. Otro efecto negativo que se ha documentado, producido por una mayor hermeticidad en las edificaciones, es el sobrecalentamiento excesivo de los espacios interiores, que lleva a que sean necesarios sistemas de refrigeración incluso en países de clima frío, donde las temperaturas en verano no son elevadas (Badescu, Laaser, & Crutescu, 2010; Oropeza-Perez & Østergaard, 2014).

Siguiendo esta tendencia de dotar de mayor hermeticidad a los edificios, la normativa española actual presupone que los edificios de uso no residencial incluyen unidades de tratamiento de aire y que, por tanto, la ventilación se realizará con sistemas mecánicos. Esto se observa en una normativa que no regula la ventilación necesaria para la salubridad en uso no residencial (Código Técnico de la Edificación (CTE) (Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Ministerio de Fomento, n.d.), remitiendo para el análisis de este aspecto en edificios no residenciales al Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) de 2007 (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013). Por contraposición a esto, en edificación residencial, se considera que la ventilación de los espacios, independientemente de que tengan un determinado grado de estanqueidad, se puede realizar mediante sistemas de ventilación natural o híbrida.

En el marco de los edificios de uso educativo en Andalucía, el uso de los sistemas mecánicos, que comenzó a llevarse a cabo desde la entrada en vigor del RITE 2007 (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria



Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013), está presentando numerosos problemas, tanto de coste inicial como operacional y de mantenimiento. Así mismo, y al margen del coste económico, si no se lleva a cabo un mantenimiento adecuado, estos sistemas suponen un potencial problema de salud para los usuarios, no dando respuesta a los requerimientos de Calidad de Aire Interior necesarios, pudiéndose producir el síndrome del edificio enfermo (Ole Fanger, 2001). En cuanto a su consumo energético, suele ser eléctrico, lo cual conlleva importantes emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas.

A nivel internacional, la utilización de Sistemas de Ventilación Natural (SVN) en los edificios, cuyos principios físicos de funcionamiento se basan en el movimiento del aire por las diferencias de presiones y la acción del viento, se presenta como una oportunidad de garantizar la CAI sin gasto de energía ni problemas asociados a falta de mantenimiento (Allard, Santamouris, Alvarez, European Commission. Directorate-General for Energy., & ALTENER Programme., 1998; Chartered Institution of Building Services Engineers., 2014; Tymkow, P., Tassou, S., Kolokotroni, M., & Jouhara, 2013). Estos mismos sistemas, pueden además ser utilizados en épocas cálidas como soluciones pasivas de refrigeración (“Ventilative Cooling” (Energy in Buildings and Communities Programme, 2018; Venticool, 2018)), que permiten reducir el sobrecalentamiento interior inducido por los altos niveles de hermeticidad, utilizando estrategias de free-cooling y refrigeración nocturna.

En el caso concreto de Andalucía y el clima Mediterráneo, la ventilación de las aulas es necesaria durante todo el periodo escolar (los 9 meses del curso escolar con un promedio de 5 horas al día), mientras que el acondicionamiento térmico del espacio es necesario un periodo de tiempo muy inferior. En este contexto, los SVN se presentan como una solución, alternativa a los Sistemas de Ventilación Mecánica (SVM), que garantiza la salubridad y la CAI en el interior de las aulas, sin consumo de energía y evitando los problemas asociados a un mantenimiento inadecuado (Congreso, Energ, & Nula, 2017; Gil-Baez et al., 2017; Gil-Báez, Barrios-Padura, Molina-Huelva, & Roldán-Vendrell, 2017). Su uso permite reducir los consumos de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al uso y funcionamiento del edificio, mejorando su sostenibilidad. El uso de este tipo de sistemas se encuentra muy extendido en el Reino Unido (“CIBSE - Natural Ventilation Group,” n.d.) y otras localizaciones europeas, de los cuales existen numerosos estudios y ejemplos específicos, tanto en edificios de uso escolar como de otras tipologías.

Se ha identificado numerosa producción científica, a escala internacional, relacionada con el uso de SVN en todo tipo de edificios y en muy diversas localizaciones, entre las que se encuentran soluciones de Ventilación Natural (VN) en edificios escolares en clima mediterráneo. Por ejemplo, el proyecto Zemeds (ZEMeds, n.d.), cofinanciado por la Unión Europea en el programa “Intelligent Energy Europe”, se centra en el estudio de la renovación de las escuelas de la región europea de la costa mediterránea, donde representan una parte importante del stock de edificios, con alrededor de 87.000 centros escolares sólo en Italia, Grecia, España y Francia. Según éste la obtención de edificios de Consumo Casi Nulo podrá lograrse combinando soluciones de alta eficiencia energética junto con el uso de energías renovables. A su vez, ponen de manifiesto que el estudio de soluciones de alta eficiencia energética ha sido muy desarrollado para climas del norte y centro Europa, pero que sin embargo no han tenido el mismo desarrollo en el clima mediterráneo, aun representando el 17% de la población de la UE (86 millones de personas). Analizan la situación actual de los edificios escolares en 4 países mediterráneos (Francia, Grecia, Italia y España). En el caso de España se analiza la situación general que deriva de la aplicación del RITE (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013) en cuanto a la tasa de ventilación, haciendo mención a la situación específica de Cataluña, donde la tasa de renovación de aire que emplean es inferior (8,5 l/s persona en relación a los 12,5 l/s por aplicación literal del RITE) y siguen el estándar UNE-EN 15251. Sin embargo, hasta el momento de desarrollo del presente estudio, no se ha encontrado ninguna publicación de ámbito nacional en relación a este asunto en edificios escolares. Así mismo, existe una extensa bibliografía y reglamentación a nivel internacional pero no se ha identificado una normativa específica sobre la materia a nivel nacional.

El presente estudio se ha desarrollado en el marco del proyecto ClimAct “Transición a una economía baja en carbono en las escuelas” (“ClimAct. Transition to a low carbon economy in schools,” 2017), del Programa Interreg Sudoe, con ámbito un temporal entre 2016-2019 y participado por socios de España, Portugal, Francia y Reino

Unido, con 39 centros educativos implicados. El proyecto ClimAct se ha centrado en el análisis de soluciones para reducir la huella de carbono de los edificios de uso escolar, siguiendo objetivos de desarrollo sostenible en el ámbito Sudoe y estudiándose entre otros los sistemas HVAC y de ventilación.

En este trabajo de investigación se presenta un SVN diseñado como alternativa a la Ventilación Mecánica (VM) para garantizar la CAI de las aulas de edificios de uso educativo, sin consumo de energía y con mejores garantías de salubridad. Esta solución colabora en la mejora de la sostenibilidad del edificio a lo largo de su vida útil, reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al funcionamiento de sistemas mecánicos de ventilación, así como garantiza la salubridad de los espacios durante el uso de los mismos. Como factor añadido, estos sistemas se pueden emplear como estrategias de refrigeración pasiva o “ventilativa” (Ventilative Cooling) (Energy in Buildings and Communities Programme, 2018; Venticool, 2018), reduciéndose también la posible demanda de energía de refrigeración que podría derivarse de las elevadas cargas internas que se producen en las aulas por su condición de espacios de elevada densidad de ocupación.

El marco de estudio y análisis se ha centrado en Andalucía, por ser representativo del clima Mediterráneo como ámbito diferenciado del clima del norte de Europa. El diseño del sistema parte del análisis de experiencias reales existentes en edificios construidos en las últimas décadas del siglo XX (CIBSETM57, 2015; Department for Education and skills, 2006) y en ejemplos de la construcción escolar tradicional en Andalucía, en los que cada aula se ventilaba con estrategias pasivas de ventilación natural, basadas en la ventilación cruzada y el efecto chimenea (Gil-Baez et al., 2017). Estos diseños se analizan desde el prisma de la tecnología y el conocimiento actuales (software de cálculo, equipos de medida y monitorización, etc...). El dimensionamiento del sistema se realiza utilizando un programa de cálculo termodinámico y de fluidos computacional (CFD) con el que se realizan diferentes simulaciones de un edificio escolar prototipo, que se utiliza como modelo. Posteriormente ambos sistemas de ventilación natural y mecánica se implementan en un edificio de nueva planta que se utiliza de edificio demostrador sobre el que se realizan mediciones, analizando comparativamente ambas soluciones para validar el sistema (Gil-Báez et al., 2017).

Como principal conclusión se confirma la viabilidad de utilización de los SVN como sistemas pasivos para obtener una adecuada CAI y confort en el interior los edificios, mejorando su sostenibilidad a corto medio y largo plazo al reducir el consumo de energía, así como la salubridad de los espacios al minimizar los riesgos derivados de la falta de mantenimiento de los sistemas mecánicos. De este modo, se muestra cómo estos sistemas constituyen una oportunidad a considerar en el diseño de edificios de uso docente de consumo casi nulo. Así mismo, las conclusiones del presente trabajo se pueden extrapolar y adecuar al diseño de otro tipo de edificios (por ejemplo comercial, administrativo o residencial). Adicionalmente, el desarrollo de esta tecnología en Andalucía puede suponer una oportunidad de negocio tanto para empresas especializadas en las soluciones comerciales (instaladores, comercializadores...), como en el ámbito de la consultoría técnica y el diseño de edificios. Así mismo, el impulso de su desarrollo en el ámbito de la investigación y a nivel comercial podría permitir a Andalucía constituirse en pionera en materia de arquitectura bioclimática. Para ello es fundamental que se conozcan los principios de funcionamiento y dimensionamiento de estos sistemas y tener en cuenta la necesidad de que su integración debe considerarse desde las primeras fases del diseño de los edificios, de manera que tanto ingenieros como arquitectos estén implicados en el proceso. Así mismo, dado el limitado conocimiento que hay aún a día de hoy en esta materia en gran parte del colectivo técnico local, las acciones de difusión y formación en este ámbito son fundamentales para obtener un nivel de competencia adecuada entre los agentes implicados y un grado suficiente de integración en los edificios.

Esta tesis se ha organizado en 9 capítulos precedidos de esta introducción. El contenido se completa con un resumen inicial, un índice general y un prólogo donde se centra el marco teórico de la investigación, así como con las listas de abreviaturas, tablas y figuras y una bibliografía con la relación de referencias incluida al final. En cuanto a los capítulos, aun cuando el presente trabajo de investigación constituye un documento completo, cada uno de los capítulos se han tratado como un sub-documento dentro del mismo, de manera que estos se pueden leer de manera independiente o alternada, como si se tratase de publicaciones independientes.

## Lista de abreviaturas

(Orden alfabético)

AAE	Agencia Andaluza de la Energía
AIVC	Air Infiltration Ventilation Centre
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BB101	Building Bulletin 101
BRE	Building Research Establishment
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
CAE	Calidad del Aire Exterior
CAE	Calidad del aire Exterior
CAI	Calidad del Aire Interior
CEIP	Colegio de Educación Infantil y Primaria
CFD	Dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics)
CIBSE	Chartered Institution of Building Services
CMMAD	Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo
CO	monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
CTE	Código Técnico de la Edificación
DBHE	Documento Básico de Ahorro de Energía
DBHS	Documento Básico de Salubridad
DE	Directiva Europea
EECCEL	Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia
EEDS	Estrategia Española de Desarrollo Sostenible
Estados Unidos	EEUU
ETSII	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales
GBCE	Green Building Council España
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
IEA	Agencia Internacional de la Energía (International Energy Agency)
IES	Institutos de Educación secundaria
IT	Instrucciones Técnicas
kWh	kilowatiohora
l/s	litros por segundo
LCA	Life Cycle Assesment
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LOE	Ley 38/1999 de Ordenación de la edificación
m	metro
m <sup>2</sup>	metro cuadrado
m <sup>3</sup>	metro cúbico
m/s	metro/segundo
MP	Materia Particulada
NNDD	Normas de diseño y Constructivas para los edificios de uso docente en Andalucía
NZEB	Edificio de Consumo Casi Nulo (Net Zero Energy Building)
O <sub>3</sub>	ozono
°C	grado celcius
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Organización de Naciones Unidas
Pa	pascal
PEM	Presupuesto de Ejecución Material
PM 10	Materia Particulada tamaño 10
PM 2,5	Materia Particulada tamaño 2,5
PMV	Voto Medio Estimado (Predicted Mean Vote)
PPD	Porcentaje previsto de insatisfechos (Predicted Percentage of Dissatisfied)
ppm	partes por millón
RAE	Real Academia de la Lengua

RITE	Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios
SBS	Síndrome del Edificio Enfermo (Sick Building Syndrome)
SCI	Severidad Climática de Invierno
SCV	Severidad Climática de Verano
SVM	Sistema de Ventilación Mecánica
SVN	Sistema de Ventilación Natural
SVNI	Sistema de Ventilación Natural Inteligente
US	Universidad de Sevilla
UTA	Unidades de Tratamiento de Aire
VERDE	Valoración de Eficiencia de Referencia de Edificios
VH	ventilación híbrida
VM	ventilación mecánica
VN	ventilación natural
ZC	Zona Climática
€	euro

## Lista de tablas

Tabla 1.1. Resumen de características para edificios pasivos. (fuente: elaboración propia a partir de los datos de (M. (Matheos) Santamouris & Wouters, 2006) y (M. Santamouris, 2007))	47
Tabla 1.2. Proyectos de investigación relacionados con la ventilación	70
Tabla 1.3. Principales asociaciones y redes especializadas en ventilación, Calidad del Aire Interior y hermeticidad	71
Tabla 1.4. Distintas aplicaciones para el diseño y cálculo de la VN en edificios. (fuente: elaboración propia)	90
Tabla 1.5. Algunos artículos sobre ejemplos de VN	94
Tabla 1.6. Proyectos de investigación centrados en edificios de uso educativo	98
Tabla 1.7. La ventilación natural en el marco de la normativa de edificios escolares	109
Tabla 2. 1. Estructura de la hipótesis	125
Tabla 4.1. Enseñanzas de régimen general (CEJA, n.d.)	144
Tabla 4.2. Características por tipo de centro (fuente: elaboración propia)	145
Tabla 4.3. Densidad de ocupación según el nivel educativo	153
Tabla 4.4. Calor metabólico en función de la edad según la fórmula de Haycock (fuente: elaboración propia)	154
Tabla 4.5. Temperaturas exteriores en horario escolar. Promedio de las 3 bases de datos	162
Tabla 4.6. Recomendaciones de "Arquitectura y Clima en Andalucía: manual de diseño" (Jaime Lopez de Asiain, Rafael González Sandino, José María Cabeza Laínez, Margarita de Luxán García de Diego, Flavio Celis D'Amico, Fernando da Casa Martín, Ernesto Echevarría Valiente, 1997) para la zona climática A3	168
Tabla 4.7. Resumen de datos del proyecto de los 10 casos analizados	173
Tabla 4.8. Resumen de datos de técnicos de los SVM de proyecto de los 10 casos analizados	173
Tabla 4.9. Estimación de consumos debidos al funcionamiento de los SVM diseñados en diversos edificios de uso escolar	174
Tabla 4.10. Coste por tipo de combustible	
Tabla 4.11. Estimación de coste anual y a 30 años en €	175
Tabla 4.12. CO <sub>2</sub> emitido en kg al año y a 30 años por centro educativo usando un SVM	176
Tabla 4.13. CO <sub>2</sub> emitido en kg al año y a 30 años por centro educativo usando un SVM	176
Tabla 4.14. Condiciones de diseño de SVM en edificios de uso escolar (promedios de los obtenidos de casos reales de la Tabla 8)	177
Tabla 4.15. Consumo de energía debido a SVM en una renovación del 25% de parque edificado en Andalucía.	177
Tabla 4.16. Consumo de energía debido a SVM en una renovación del 25% de parque edificado en zona mediterránea	177
Tabla 4.17. Resumen de las exigencias técnicas que deben cumplirse según los artículos 10 y 11 del RITE 2007	180
Tabla 4.18. Resumen de consideraciones a tener en cuenta antes del diseño de un SVN en un edificio escolar	181
Tabla 4.19. Límites de concentración de CO <sub>2</sub> según el BB101	186
Tabla 5.1. Tipos de consumo en centros escolares. (fuente: elaboración propia)	200
Tabla 5.2. Valores de referencia. A. contaminantes químicos; B. Materia Particulada; C. CO <sub>2</sub>	206
Tabla 5.3. Clasificación de los centros según su localización y nivel educativo (1 I:Infantil (3-6 años); P:Primaria (6-12 años); S:Secundaria (12-16 años); B:Bachillerato (17-18); CF (>18)	208
Tabla 5.4. Características de la edificación	209
Tabla 5.5. Características constructivas	210
Tabla 5.6. Régimen de funcionamiento	210
Tabla 5.7. Ensayos por centro y aula	210
Tabla 5.8. Ensayos por centro y aula (Equipos portátiles de medida en continuo (utilizados en interior y exterior)	212
Tabla 5.9. Dispositivos passive samplers (para conocer los niveles ambientales de compuestos orgánicos volátiles y formaldehidos)	212

Tabla 5.10. Resultados de los ensayos pasivos: COV	214
Tabla 5.11. Resultados de los ensayos pasivos: Aldehidos	214
Tabla 5.12. Medidas interiores y exteriores de MP (valores acumulados)	215
Tabla 5.13. Resultados de concentración de CO <sub>2</sub> máxima, mínima y valor promedio en las aulas analizadas y condiciones de apertura de ventanas y protecciones solares y ocupación. (fuente: elaboración propia)	216
Tabla 5.14. Medidas exteriores de CO <sub>2</sub> , temperatura y humedad (valor promedio). (fuente: elaboración propia)	216
Tabla 5.15. Comparación de los valores medidos de contaminantes con los publicados por la OMS para otros colegios analizados en Europa. (fuente: elaboración propia)	218
Tabla 5.16. Niveles de CO <sub>2</sub> como indicador de la CAI	224
Tabla 5.17. Características de los equipos de medida	224
Tabla 5.18. Edificio A. Principales características del edificio existente con VN y aula de ensayo	225
Tabla 5.19. Edificio B. Principales características del edificio existente con VM y aula de ensayo	226
Tabla 5.20. Edificio A (VN). Datos del ensayo	228
Tabla 5.21. Edificio B (VM). Datos del ensayo	229
Tabla 5.22. Parámetros de diseño de las aulas (fuente: elaboración propia)	240
Tabla 5.23. Resumen de características básicas del edificio modelo	240
Tabla 5.24. Condiciones de funcionamiento	241
Tabla 5.25. Parámetros de calefacción y ventilación para el Edificio a.1	241
Tabla 5.26. Parámetros de calefacción y ventilación para el Edificio b.1	242
Tabla 5.27. Factores de conversión	243
Tabla 5.28. Edificio a.1 (SVN). Uso energía total	
Tabla 5.29. Edificio b.1 (SVM). Uso de energía total	243
Tabla 5.30. Reducción del consumo de energía (SVM-SVN). (fuente: elaboración propia)	244
Tabla 5.31. Cumplimiento de las Exigencias Técnicas de la solución de ventilación alternativa con un SVN	246
Tabla 6.1. Características del edificio	259
Tabla 6.2. Características de las baterías de calor (fuente: datos libro del edificio, archivo APAE)	265
Tabla 6.3. Características de los recuperadores (según datos del libro del edificio)	265
Tabla 6.4. Estimación de consumo de los motores de las UTAS (según datos del libro del edificio)	266
Tabla 6.5. Estimación del consumo de gas natural anual de las baterías de calor	267
Tabla 6.6. Valores de referencia para caracterizar la CAI del caso de estudio. A. contaminantes químicos; B. niveles de CO <sub>2</sub> como indicador de la CAI	271
Tabla 6.7. Sensores individuales de medida en continuo y KNX del edificio test (equipo fijos)	271
Tabla 6.8. Equipos portátiles de medida en continuo	271
Tabla 6.9. Características de los dispositivos de toma de medidas pasivas (passive samplers)	272
Tabla 6.10. Identificación de las aulas ensayadas, sistema de ventilación y equipo de ensayo en cada etapa del plan de medidas	274
Tabla 6.11. Resultados medidas pasivas Aldehidos	279
Tabla 6.12. Resultados medidas pasivas COV	280
Tabla 6.13. Registro de actividad aula de infantil API2	282
Tabla 6.14. Registro de actividad aula de infantil API3	283
Tabla 6.15. Registro de actividad aula de infantil API4	283
Tabla 6.16. Registro de actividad aula de primaria APP1	284
Tabla 6.17. Registro de actividad aula de primaria APP3	284
Tabla 6.18. Registro de actividad aula de primaria APP5	285

## Lista de figuras

Fig.1. 1 Objetivos de la Agenda 2030 sobre el desarrollo sostenible (“Objetivos desarrollo sostenible ONU,” n.d.)	41
Fig.1.2 Colegio con sello Breeam y ventilación natural. Fuente (“BREEAM,” n.d.)	42
Fig.1.3. Imagen Passivhaus (“Passive House Institute,” n.d.)	43
Fig.1.4. Estrategias de diseño bioclimático. Izda.) Ventilación cruzada. Dcha.) Ventilación por efecto chimenea. (fuente: reproducido de (Jaime Lopez de Asiaín, Rafael González Sandino, José María Cabeza Lainez, Margarita de Luxán García de Diego, Flavio Celis D’Amico, Fernando da Casa Martín, Ernesto Echevarría Valiente, 1997)).	44
Fig.1.5. Torres de viento de Irán. (fuente: reproducido de (Passe & Battaglia, 2015))	46
Fig.1.6. Efecto de la masa térmica y la tasa de ventilación en la temperatura interior. (fuente: reproducido de (CIBSE, 2005))	46
Fig.1.7. Energía final consumida según “Transition to sustainable buildings: Strategies and opportunities to 2050” IEA (International Energy Agency, 2013).	48
Fig.1.8. Imagen de nuevos sistemas de acondicionamiento en los edificios, nuevos diseños (pabellón de España en Dubai 2019. (fuente: <a href="https://www.accioncultural.es/es/ExpoSpain2020">https://www.accioncultural.es/es/ExpoSpain2020</a> ))	50
Fig.1.9. Isla de calor. Reproducido de (EPA, 2017) (imagen tomada en Utah el 13 de Julio de 1998. Las áreas blancas están en el entorno de los 70°C y las azul oscuro en 30°C. La superficie urbana más caliente (izquierda de la imagen) y las superficies más frías están a la derecha en las laderas	51
Fig.1.10. Night ventilation. (fuente: <a href="http://www.passivent.com">http://www.passivent.com</a> (“Passivent,” n.d.))	52
Fig.1.11. Fórmula propuesta por Humphreys y Nicol (J F Nicol & Humphreys, 2002)	54
Fig.1.12. Thermal confort standard. ASHRAE 55 (American Society of Heating refrigerating an air conditioning engineers, 2004)	55
Fig.1.13. Dominios de la ventilación, calefacción y refrigeración. Reproducido de (Germano, Ghiaus, & Roulet, 2004)	55
Fig.1.14. Acumulado anual de CO2 según el DBHS del CTE (Ministerio de Fomento, 2017)	58
Fig.1.15. Aumento de los sistemas de ventilación por incremento de los requerimientos de hermeticidad. (fuente Tightvent (“TightVent Europe. Building and ductwork airtightness platform,” n.d.))	60
Fig.1.16 Balance gasto energético calefacción vs ventilación (fuente propia)	60
Fig.1.17. Relación típica entre tasa de ventilación y la energía usada para ventilación. (Allard et al., 1998; ECA Urban air indoor environment and human exposure, 2003)	61
Fig.1.18. Sistemas de ventilación. Clasificación básica (fuente propia)	62
Fig.1.19. Imagen de una UTA. en la cubierta de un edificio escolar de educación secundaria en Sevilla. (fuente propia)	63
Fig.1.20. Análisis para seleccionar el sistema de ventilación en el edificio. Reproducido de (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005)	65
Fig.1.21. Sistema de ventilación individualizado. (fuente: reproducido de (Ole Fanger, 2001))	65
Fig.1.22. Análisis comparativo de un edificio funcionando con un Sistema VN, Sistema VM y Sistema VH en tres localizaciones. Arriba) consumo de energía primaria en kWh/m2 año; centro) emisiones de CO2 en kg/m2 año; abajo) análisis del ciclo de vida en euros (fuente: reproducido de <a href="https://www.windowmaster.com">https://www.windowmaster.com</a> (“Windowmaster,” n.d.))	66
Fig.1.23 Contaminantes según el estándar ASHRAE 62.1. Reproducido de (ASHRAE, 2009)	68
Fig.1.24 Concentración de contaminantes según el estándar ASHRAE 62.1. Reproducido de (ASHRAE, 2009)	68
Fig.1.25 Variación de la tasa mínima de ventilación en USA. Reproducido de (Hazim B Awbi, 1998)	69
Fig.1.26. Evolución de los requerimientos de ventilación según ASHRAE 62. Reproducido de (ECA Urban air indoor environment and human exposure, 2003)	69
Fig.1.27 Ventanas diseñadas para ventilación. (fuente: propia)	73
Fig.1.28 Efecto combinado del viento y la diferencia de presiones- Reproducido de (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005)	74
Fig.1.29. Ecuaciones de Navier-Stokes	75
Fig.1.30. Condicionantes de diseño de la VN. Reproducido de (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005)	75



Fig.1.31. Comparación entre ventilación mecánica constante (izda.) y ventilación natural variable (dcha.). Reproducido de (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005)	76
Fig.1.32. Efecto de la velocidad del viento en la temperatura (izda.) y de la masa en la inercia térmica (dcha.) Reproducido de (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005)	77
Fig.1.33. Admisiones de aire en ventilación a una cara. Fuente (Department for Education and skills, 2006)BB101 (Department for Education and skills, 2006)	77
Fig.1.34. Ventilación cruzada (a) y ubicación de aberturas en efecto chimenea (b) en ventilación natural. Fuente BB101 (Department for Education and skills, 2006)	78
Fig.1.35. Sistema de captación de viento con conductos a cubierta ("Split duct roof mounted ventilation") (BB 101) (Department for Education and skills, 2006)	78
Fig.1.36. Windcatchers en cubierta. ("Monodraught: Engineering delivered. Naturally," n.d.)	78
Fig.1.37. Presión del viento sobre el edificio: Reproducido de (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005)	79
Fig.1.38. Suministro de aire por chimeneas en un edificio escolar en Alemania. Reproducido de (Hellwig et al., 2017)	79
Fig.1.39. Ejemplo de estrategias de VN en un edificio. Reproducido de (Cook & Short, 2017)	80
Fig.1.40. Distintos tipos de ventana y su consideración para los SVN. Reproducido de (Department for Education and skills, 2006)	81
Fig.1.41. Penetración y distribución de la entrada de aire por ventanas altas. Izda.) reproducido de (Heiselberg et al., 2017); dcha.) reproducido de (Heiselberg, 2017)	82
Fig.1.42. Mapa geográfico del nº de horas NV en 1854 localizaciones. Reproducido de (Y. Chen et al., 2017)	83
Fig.1.43. Diferencia de presiones debidas al efecto chimenea y al efecto del viento. Izda.) sólo efecto chimenea; dcha.) sólo viento. Reproducido de (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005)	84
Fig.1.45. Potencial de utilización de la estrategia "ventilative cooling" en distintas localizaciones. Reproducido de (Ventilative Cooling Design Guide Energy in Buildings and Communities Programme, 2018)	85
Fig.1.46. Estudios sobre ventilación natural. Reproducido de (Y. Chen et al., 2017)	86
Fig.1.46. Nº de publicaciones con la palabra clave "natural ventilation" en la base de datos Scopus (acceso en diciembre de 2018) ("www.scopus.com," n.d.): por área de conocimiento (a), año (b), fuente (c) y afiliación (d) (fuente: elaboración propia)	87
Fig.1.47. Imagen de simulación en CFD ("DesignBuilder Software Ltd - Home," n.d.)	91
Fig.1.48. Ventanas con apertura automatizada en Fibes (Sevilla). Fuente propia	92
Fig.1.49. Distintos dispositivos para los SVN. Izda) Windcatcher ("Monodraught: Engineering delivered. Naturally," n.d.); Dcha) Actuador de ventana automática ("Windowmaster," n.d.)	92
Fig.1.50. Diseño de ventana con propósito de ventilación en "El Capricho de Gaudí" (Comillas). (fuente: propia)	93
Fig.1.51. Elementos diseñados para ventilación. Izda.) ventanas en el IST de Lisboa (fuente propia); dcha.) aperturas de ventilación con rejillas (reproducido de (CIBSE, 2013))	94
Fig.1.53. Edificios con VN. Izda) "The Crystal". Fuente "windowmaster"("Windowmaster," n.d.). Dcha) Royal Chelsea Hospital ("Monodraught: Engineering delivered. Naturally," n.d.)	95
Fig.1.53. Objetivo para alcanzar un edificios escolar de consumo casi nulo en zona mediterránea según proyecto Zemeds (NZEB renovation for Mediterranean schools, n.d.).	100
Fig.1.54. La Calidad del Ambiente Interior. arriba) según proyecto Zemeds (NZEB renovation for Mediterranean schools, n.d.); abajo) El círculo ambiental. Reproducido de BB 101 (2016) (Department for Education UK, 2016)	100
Fig.1.55. Tipos de sistemas de ventilación. Fuente: BB 101 (2016) [17]	102
Fig.1.56. Valor de la temperatura máxima aceptable en edificios en oscilación libre. "Natural ventilation in the Priority School Building Programme". ("Windowmaster," n.d.)	103
Fig.1.57. Tasa de ventilación Q requerida para mantener la concentración de un determinado contaminante dentro de un valor deseado. (reproducido de (Hazim B Awbi, 1998))	106
Fig.1.58. Balance energético. Fuente Monodraught ("Monodraught: Engineering delivered. Naturally," n.d.)	107



Fig.1.59. Criterios de selección de la mejor estrategia de ventilación según el proyecto Zemeds (NZEB renovation for Mediterranean schools, n.d.)	110
Fig.1.60 Recomendaciones para el diseño de sistemas de Ventilación Natural del proyecto Zemeds (NZEB renovation for Mediterranean schools, n.d.)	111
Fig.1.61. Edificios escolares con SVN. a. Monkseaton highschool (Tyne and Wear) ("Breathing Buildings," n.d.); b. Seaside school (Lancing) ("Monodraught: Engineering delivered. Naturally," n.d.); c. Valleys School (Bridgend) ("Passivent," n.d.); d. Facultad de derecho Universidad de Baltimore ("Windowmaster," n.d.)	111
Fig.1.62. Distintos ejemplos de edificios escolares con SVN. (Fuente: Monodraught ("Windowmaster," n.d.), Windowmaster("Monodraught: Engineering delivered. Naturally," n.d.))	112
Fig.1.63. Chimenea de ventilación de un aula en la cubierta de un centro escolar en la provincia de Sevilla (fuente propia)	113
Fig.3. 1. Esquema de los medios para el desarrollo de la Etapa 1.	133
Fig.3. 2. Esquema del proceso de investigación desarrollado siguiendo la metodología	134
Fig.4.1. Estructura del parque público andaluz de centros educativos de enseñanzas no universitarias. (fuente: elaboración propia)	144
Fig.4.2 Ejemplo de implantación de un centro escolar en Bormujos, Sevilla. (fuente: google maps)	145
Fig.4.3. Distribución típica de un edificio escolar. a) Planta baja de un IES en Sevilla (fuente: arriba archivo APAE (C. de E. Junta de Andalucía, n.d.); b) Ventanas altas practicables al pasillo. (fuente: elaboración propia)	146
Fig.4.4. Plantas de aulas: izquierda) aula de educación primaria; derecha) aula de educación infantil. (fuente: reproducido de NNDD (Consejería de Educación y Ciencia. Junta de Andalucía et al., 2003).	147
Fig.4.5. Rangos aceptables de temperatura operativa para espacios acondicionados naturalmente. (reproducido de Ashrae 55 "Thermal comfort standard" (American Society of Heating refrigerating an air conditioning engineers, 2004))	148
Fig.4.6. Distribución por meses de las horas en que es necesaria la calefacción en relación a la "época de invierno" definida por la UNE 100-014 para el cálculo de las instalaciones de climatización en relación a las horas totales anuales. a) clima suave; b) clima frío. (fuente: elaboración propia).	149
Fig.4.7. Patrones de demanda de calefacción y ventilación en edificios escolares en clima mediterráneo en término de porcentaje de días al mes. (fuente: elaboración propia).	149
Fig.4.8. Elementos para posibilitar la ventilación cruzada del aula al pasillo. (fuente: elaboración propia)	150
Fig.4.9. Ventanas con secciones altas diseñadas específicamente para ventilación. Izda.) Imagen de un aula en el Grupo escolar Cervantes (fuente: <a href="https://www.educa2.madrid.org/web/centro.cp.cervantes.madrid/historia-del-centro">https://www.educa2.madrid.org/web/centro.cp.cervantes.madrid/historia-del-centro</a> ); Dcha.) Imagen de un aula en un centro escolar en Sevilla (fuente: elaboración propia)	150
Fig.4.10. Estructura del curso escolar en el calendario anual. (fuente: elaboración propia)	151
Fig.4.11. Esquema de ocupación no permanente de los edificios. (fuente: elaboración propia).	152
Fig.4.12. Variación en la ocupación diaria del aula de lunes a viernes. (fuente: propia)	153
Fig.4.13. Distribución del porcentaje de centros en función del titular. (fuente: elaboración propia en base a los datos de la Consejería de Educación)	154
Fig.4.14. Zonas climáticas en Europa según la clasificación de Köppen (reproducido de (Schneider & Laiz, 2013))	157
Fig.4.15. Temperatura media anual en Andalucía (JUNTA DE ANDALUCIA, n.d.)	157
Fig.4.16. Promedio mensual de temperatura según la base de datos de la Comisión Europea PVSIG (European Commission, n.d.)	158
Fig.4.17. Estimación de radiación solar mensual en kWh/m2 según PVSIG (European Commission, n.d.)	158
Fig.4.18. Zonas climáticas por municipios. a) invierno (SCI severidad climática de invierno); b) verano (SCV severidad climática de verano) (. Reproducido de (Agencia Andaluza de la Energía, 2008)	159
Fig.4.19. Zonas climáticas (ZC) en Andalucía. Nº de municipios con una zona climática determinada. (Fuente: Elaboración propia según datos obtenidos de (Agencia Andaluza de la Energía, 2008))	159
Fig.4.20. Zonas climáticas en Andalucía. Nº de municipios con una zona climática determinada por provincias. (Fuente: Elaboración propia según datos obtenidos de (Agencia Andaluza de la Energía, 2008))	159

Fig.4.21. Temperaturas medias mensuales por horas y zona climáticas. (Fuente: elaboración propia según los archivos .met (Ministerio de Fomento, n.d.-b))	161
Fig.4.22. Evolución de la temperatura exterior durante la jornada lectiva en época de verano según 3 bases de datos diferentes: a) Mayo, b) Junio and c) Septiembre. En la abscisa se representa los días del mes y en el eje y la temperatura en °C para la zona climática C3 (fuente: propia)	163
Fig.4.23. Evolución de la temperatura exterior en el día más caluroso identificado en las bases de datos analizadas: a) CTE (mayo); b) AMT (junio); c) AMT (septiembre) (fuente: propia)	164
Fig.4.24. Carta de Olygay. Reproducido de la publicación (Jaime Lopez de Asiaín, Rafael González Sandino, José María Cabeza Laínez, Margarita de Luxán García de Diego, Flavio Celis D'Amico, Fernando da Casa Martín, Ernesto Echevarría Valiente, 1997)	165
Fig.4.25. Diagrama de Givoni. Reproducido de la publicación (Jaime Lopez de Asiaín, Rafael González Sandino, José María Cabeza Laínez, Margarita de Luxán García de Diego, Flavio Celis D'Amico, Fernando da Casa Martín, Ernesto Echevarría Valiente, 1997)	167
Fig.4.26. Ventanas específicamente diseñadas para ventilación en un centro educativo en Sevilla. (fuente: propia).	171
Fig.4.27. Implantación de los 10 casos analizados (fuente: propia e imágenes aéreas obtenidas de google maps)	178
Fig.4.28. Condiciones de diseño de la instalación térmica para satisfacer la exigencia de calidad térmica del ambiente según el RITE 2007 (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013)	184
Fig.4.29. Temperatura neutra en edificios en oscilación libre en relación a la temperatura exterior. Reproducido de CIBSE TM52 (CIBSE, 2013).	184
Fig.4.30. Clasificación básica de la CAI: a) y b) según la UNE EN 13779 (AENOR, 2005) y c) según el RITE 2007 (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013)	185
Fig.4.31. Tasas de aire exterior por persona. según la UNE EN 13779 (AENOR, 2005)	185
Fig.4.32. Contaminantes producidos por fuentes del interior de los espacios según la OMS. Reproducido de (WHO, 2010)	187
Fig.4.33. Contaminantes: a) Reproducido de "School environment: policies and current status" (WHO) (WHO Regional Office for Europe, 2015); b) . Indicadores para la monitorización de la CAI en escuelas europeas s/ BB101 (2016). Reproducido de (Department for Education UK, 2016)	187
Fig.4.34. Compuestos orgánicos volátiles (COV): unidades y cuantificación de valores según diferentes guías de calidad de aire interior. Reproducido de (Becerra et al., 2020)	189
Fig.4.35. Aldehídos, unidades y cuantificación de valores según diferentes guías de calidad de aire interior. Reproducido de (Becerra et al., 2020)	190
Fig.4.36. Niveles de MP: unidades y cuantificación de valores de guías de calidad de aire interior. Reproducido de (Becerra et al., 2020)	190
Fig.4.37. Caracterización del aire exterior según la UNE EN 13779 (AENOR, 2005). a) Ejemplos de concentraciones de contaminantes en el exterior. b) Clasificación del aire exterior (ODA)	191
Fig.4.38. CO <sub>2</sub> ; unidades y cuantificación según diferentes guías. Reproducido de (Becerra et al., 2020)	192
Fig.5.1. Izda.) Imagen del edificio; Dcha.) Condiciones climáticas de la zona de estudio (Reproducido de (Gil-Baez et al., 2019))	201
Fig.5.2. Demanda neta desglosada. Por meses (izquierda) y por componentes de la envolvente del edificio (derecha) (Reproducido de (Gil-Baez et al., 2019))	201
Fig.5.3. a) Uso de energía kWh/m <sup>2</sup> año, según datos obtenidos de (Gil-Baez et al., 2017) y b) consumo de energía en kWh/m <sup>2</sup> año (datos de facturas)	202
Fig.5.4.Elementos con efecto negativo y positivo en la demanda de refrigeración y calefacción. Datos de (Gil-Baez et al., 2019)	203
Fig.5.5.Elementos con efecto negativo y positivo en la demanda de calefacción y refrigeración. Datos de (Gil-Baez et al., 2019) en kWh/m <sup>2</sup>	204
Fig.5.6.Opciones de mejora en la demanda de energía: a) oportunidades de mejora de calefacción; b) oportunidades de mejora en la refrigeración	205
Fig.5.7. Demanda real considerando el cierre del verano y el régimen de ocupación de 5 horas diarias	205

Fig.5.8. Localización de los centros. (fuente: elaboración propia)	207
Fig.5.9. Centros de educación infantil y primaria. (fuente: elaboración propia)	208
Fig.5.10. Centros de educación secundaria. (fuente: elaboración propia).	209
Fig.5.11. Ubicación del equipo de medida. Izda.) exterior; dcha.) interior. (fuente: elaboración propia)	211
Fig.5.12. Localización equipo medidas interiores, arriba) en continuo; abajo) medidas pasivas (passive sampler). (fuente:propia)	211
Fig.5.13. Tipos de ventanas: arriba) exteriores (protección solar lamas izda. y persianas dcha.; abajo) interiores a pasillo (apertura abatible izda. y corredera dcha.) (fuente: elaboración propia)	212
Fig.5.14. Compuestos orgánicos volátiles medidos en continuo. Superior) valores máximos, mínimos y medios durante de concentración de COVt en aulas comparado con la concentración exterior. Inferior) Evolución típica diaria de la concentración de COVt interior del aula. (Reproducido de (Becerra et al., 2020)).	213
Fig.5.15. Valores de concentración de MP máximo, mínimo y medio, medido en el interior y el exterior: Superior) valores para PM10; Inferior) valores para PM 2,5. Datos publicados en (Becerra et al., 2020)	215
Fig.5.16. Evolución del nivel interior de partículas (PM 10my PM 2,5) en el edificio analizado E5: a. día 1; b. día 2. (fuente: elaboración propia)	217
Fig.5.17. Valores de promedio de contaminantes medidos en escuelas en Europa. Datos de la OMS. Reproducido de (WHO Regional Office for Europe, 2015)	218
Fig.5.18. Evolución típica de los niveles de CO2, temperatura y humedad en las aulas durante el periodo de ocupación (fuente: elaboración propia)	219
Fig.5.19. Evolución de la concentración de CO2 característica. Superior) Ejemplo de oscilación de CO2 en un día lectivo de un aula en una escuela en Andalucía según la campaña de medidas (reproducido de (Becerra et al., 2020);	220
Fig.5.20. Relación de la evolución de la concentración de CO2 con la ocupación y la apertura de ventanas (fuente propia)	220
Fig.5.21. Niveles de concentración de CO2 durante el periodo lectivo para cada una de las aulas y días de ensayos. Valores representados máximos, mínimos y promedios en relación al promedio de referencia de 1500 ppm (fuente propia)	221
Fig.5.22. Ventanas al pasillo abiertas durante la realización de las medidas. Izda.) Aula 1 del edificio E3 el día 1 de ensayo.; Dcha.) Aula 1 del edificio E6 el día 2 de ensayo (fuente: elaboración propia).	222
Fig.5.23. Edificio A. Superior izda.) imagen del patio; Superior centro) ubicación aula 31 (fuente: planos archivo APAE); Superior dcha.) ubicación de chimeneas en planta (fuente: planos archivo APAE); Inferior izda.) ventanas al exterior; Inferior dcha.) rejillas de ventilación conectadas con el shunt de cubierta y data logger. (Fuente: elaboración propia)	225
Fig.5.24. Edificio A. Izda.) Chimeneas del shunt en cubierta. Dcha.) sección de la chimenea (Fuente: elaboración propia)	226
Fig.5.25. Edificio B. Arriba) ubicación aula 11. Abajo) ventanas del aula (izquierda) (izquierda) y unidades de tratamiento de aire (derecha)	226
Fig.5.26. Prueba de humo realizada para comprobar la correcta operación de la chimenea. (fuente: elaboración propia)	227
Fig.5.27. Superior) Resultados del registro de la evolución semanal de los niveles de CO2 interior de las aulas 31 y 91. (fuente: elaboración propia). Inferior) Identificación de las aulas de ensayo (fuente: archivo APAE)	227
Fig.5.28. Resultados del ensayo Edificio A (SVN) (fuente: elaboración propia)	228
Fig.5.29. Resultados del ensayo Edificio B (SVM)	229
Fig.5.30. Análisis de resultados. Superior) Edificio A; Inferior) Edificio B	230
Fig.5.31. Imagen del edificio prototipo sobre el que se desarrolla el modelo teórico para el cálculo. (fuente: archivo APAE)	235
Fig.5.32. Aspectos de diseño de SVN para escuelas. Izda.) esquema del aula para su simulación; dcha.) CFD, distribución de la temperatura con la apertura de ventanas altas (fuente: "How to avoid draught using natural ventilation" de Windowmaster ("Windowmaster," n.d.))	236
Fig.5.33. Esquema de funcionamiento ventilación cruzada+efecto stack. Izda.) Reproducido de BB101 (2006), dcha.) Reproducido de (CIBSE, 2005).	236
Fig.5.34. Imagen del diseño de las admisiones en fachada en un edificio existente. (fuente Windowmaster	237

("Windowmaster," n.d.))

Fig.5.35. Ventilación por efecto chimenea en el aula del Edificio A estudiado en el apartado anterior del capítulo 5: Izda.) Admisión apertura en el frente de fachada; dcha.) apertura de expulsión en el cerramiento opuesto al pasillo embocado hacia la chimenea conectada con la cubierta. (fuente: propia)	237
Fig.5.36. Organización del conjunto de la edificación del Edificio A estudiado en el apartado anterior del capítulo 5. Izda) axonometría del conjunto; dcha)-imagen de las chimeneas en cubierta. (fuente: propia)	237
Fig.5.37. Esquema del SVN en el aula. Izda) esquema en planta; dcha.) esquema en fachada. (fuente: elaboración propia)	238
Fig.5.38. Diferentes ubicaciones de las admisiones en fachada: Superior) Ejemplo del caso i) rejillas a la altura de los radiadores. Reproducido de (Ventilative Cooling Design Guide Energy in Buildings and Communities Programme, 2018); Inferior) ejemplo del caso ii) ventanas en la zona superior del paramento. Reproducido de (CIBSETM57, 2015)	238
Fig.5.39. Tasa de ventilación para una emisión conocida s/ UNE 13779. Reproducido de (AENOR, 2005)	239
Fig.5.40. Plantas del edificio modelo (baja y alta).(fuente: reproducido de (Gil-Baez et al., 2017))	240
Fig.5.41. Edificio Modelo de cálculo con SVN	241
Fig.5.42. SVM. UTAs en cubierta (fuente: propia)	242
Fig.5.43. Imagen simulación CFD. Velocidad del aire (fuente propia)	243
Fig.5.44. Representación del consumo energético del SVN y el ahorro energía en comparación con el SVM (kWh). Izda.) Energía final; dcha) Energía primaria. (fuente: elaboración propia)	245
Fig.5.45. Representación de las emisiones de CO2 (kg) debidas al funcionamiento del SVN y la reducción de emisiones en comparación con el funcionamiento del SVM (fuente: elaboración propia)	245
Fig.5.46. Representación de la ubicación de las admisiones en la zona superior de la fachada (fuente: elaboración propia)	247
Fig.5.47. Representación de la distribución de la temperatura con las admisiones ubicadas en la zona superior de la fachada (fuente: elaboración propia).	248
Fig.5.48. Esquema de diseño: de las aulas superpuestas independientes. (fuente: propia)	248
Fig.5.49. Elementos de automatización del SVNI. Izda.) Sonda de medida (fuente <a href="https://www.elsner-elektronik.de">https://www.elsner-elektronik.de</a> ); dcha.) Ventana automatizada (fuente: <a href="http://www.interempresas.net">www.interempresas.net</a> )	249
Fig.5.50. Mecanismos para la operación de las ventanas automática por parte del usuario. Izda.) indicador de la CAI Lum'Air, específico para la medida y control en escuelas; dcha.) interruptor para la apertura de las ventanas automáticas. (Reproducidos de (CIBSETM57, 2015)).	249
Fig.5.51. Diseño del SVNI en una aula. Superior) fachada; inferior) planta (fuente: propia)	250
Fig.5.52. Sección del edificio prototipo con el sistema estándar de VNI en las aulas (fuente: propia)	251
Fig.5.53. Tipos de aireador en cubierta. (fuente: elaboración propia)	251
Fig.6.1. Implantación del edificio. Vista aérea. (fuente: google maps)	259
Fig.6.2. Plantas y alzados: a. Planta cubierta; b. Planta alta; c. Planta baja; d. Alzado principal; e. Alzado trasero; f. Alzados laterales. Reproducido del proyecto de ejecución (fuente: archivo APAE (Junta de Andalucía, n.d.))	260
Fig.6.3. Imágenes del edificio. Arriba) Fachada principal; abajo) Entorno inmediato de acceso. (fuente: propia)	261
Fig.6.4. Imágenes de los dos sistemas en cubierta. Izda.) aireadores del SVNI y UTA del SVM; dcha.) chimeneas rematadas de aireadores (SVNI) y conductos de las UTAs (SVM) (fuente: propia)	262
Fig.6.5. Fase de construcción: a. Fachada principal; b. Chimeneas en cubierta (SVNI); c. salidas de ventilación en aulas (SVNI); d. Detalle de la salida de ventilación (SVNI). (fuente: propia)	262
Fig.6.6. Elementos del SVNI en el edificio test. Izda.) ventana automática y sonda; dcha.) rejilla conectada a chimenea (fuente: propia)	263
Fig.6.7. Elementos del SVNI en el edificio test. Izda.) chimeneas en cubierta; dcha.) imagen del autómatas de control. (fuente: propia)	263
Fig.6.8. Imágenes del SVM en cubierta. Izda.) UTA y conductos; Dcha.) UTA (fuente: propia)	263
Fig.6.9. Ubicación de las UTAS: arriba planta cubierta; abajo) planta primera. (fuente: proyecto archivo APAE)	264

Fig.6.10. Esquema de impulsión y retorno del SVM. (izda) (fuente: proyecto archivo APAE (Junta de Andalucía, n.d.); dcha) Rejilla de retorno. (Fuente: propia)	264
Fig.6.11. Esquema de las UTAs. (fuente: proyecto de ejecución y libro del edificio. Archivo de APAE (Junta de Andalucía, n.d.))	265
Fig.6.12. Imagen de la ubicación del reloj programador en el cuadro. (fuente: propia)	266
Fig.6.13. Equipos de medida fijo. Superior) Sensor fijo en aula “Sewi”. Inferior) Interfaz diálogo Knx	272
Fig.6.14. Imágenes de la disposición de los equipos de medida. Superior) Radial passive sampler (medidas pasivas); Inferior) Delta Ohm en el aula	273
Fig.6.15. Etapa 1.- Identificación de las aulas de medida seleccionadas para la etapa 1 de calibración previa (planta baja). (fuente: propia)	274
Fig.6.16. Etapa 2.- Identificación de las aulas de medida seleccionadas para la Etapa 2 de análisis de la CAI (planta alta). (fuente: propia)	275
Fig.6.17. Etapa 3.- Identificación de las aulas de medida seleccionadas para la Etapa 3 de validación. (fuente: propia)	275
Fig.6.18. Calibración de las sondas fijas del edificio (sensor Sewi-Knx con los equipos portátiles Delta Ohm). Superior) API3; Inferior) API4 (fuente: propia)	276
Fig.6.19. Calibración de las sondas fijas del edificio (sensor Sewi-Knx con los equipos portátiles Delta Ohm). Detalle de 2 días por horas en el aula API3. (fuente: propia)	277
Fig.6.20. Resultados medidos por los sensores Sewi fijos del edificio y grabados por el KNX de una semana de mayo de 2018 en 3 aulas de educación infantil. (fuente: propia)	277
Fig.6.21. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX de una semana de mayo en el aula API2 de educación infantil (SVM). (fuente: propia)	278
Fig.6.22. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX de una semana de mayo en el aula API3 de educación infantil (SVNI). (fuente: propia)	278
Fig.6.23. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX de una semana de mayo en el aula API4 de educación infantil (funcionamiento libre del usuario). (fuente: propia)	278
Fig.6.24. Valores máximos, mínimos y promedios diarios en base a los resultados medidos por las sondas y grabados por el KNX de una semana de mayo de 2018 en 3 aulas de educación infantil. (fuente: propia)	279
Fig.6.25. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX de una semana de diciembre de 2018 en 6 aulas de educación primaria. (fuente: propia)	280
Fig.6.26. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX de una semana de diciembre de 2018 en las aulas de educación APP1 Y APP2 ( con ventilación libre. (fuente: propia)	280
Fig.6.27. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX de una semana de diciembre de 2018 en las aulas de educación primaria APP3 y APP4 (con SVNI). (fuente: propia)	281
Fig.6.28. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX de una semana de diciembre de 2018 en las aulas de educación primaria APP5 y APP6 (con SVM). (fuente: propia)	281
Fig.6.29. Calibración de las sondas fijas del edificio (sensor Sewi-Knx con los equipos portátiles Delta Ohm). En el aula APP3 (fuente: propia)	281
Fig.6.30. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX y registro de actividad aula API2	282
Fig.6.31. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX y registro de actividad aula API3. (fuente: propia)	283
Fig.6.32. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX y registro de actividad aula API4. (fuente: propia)	283
Fig.6.33. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX y registro de actividad aula APP1. (fuente: propia)	284
Fig.6.34. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX y registro de actividad aula APP3	284
Fig.6.35. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX y registro de actividad aula APP5	285
Fig.6.36. Valores máximos, mínimos y promedios el día del ensayo, en base a los resultados medidos por las sondas y grabados por el KNX en abril de 2019 en 3 aulas de educación infantil (API2, API3 y API4) y 3 aulas de educación primaria (APP1, APP 3 y APP5). (fuente: propia)	285



## Índice detallado

### CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

1.	La sostenibilidad y el desarrollo sostenible	
1.1	El desarrollo sostenible	41
1.2	La sostenibilidad de los edificios	42
1.2.1	La arquitectura bioclimática. Construcción sostenible y arquitectura sostenible	43
1.2.2	Mejora de la sostenibilidad con soluciones pasivas	45
1.2.3	Arquitectura vernácula y sostenibilidad	45
1.3	La eficiencia energética	47
1.3.1	El consumo de energía en los edificios. La mejora de la eficiencia energética	48
1.3.2	Los edificios de consumo casi nulo	50
1.4	La problemática de los sistemas de refrigeración	51
1.4.1	Los sistemas de refrigeración y la demanda de energía	51
1.4.2	La refrigeración pasiva	51
1.4.3	El confort térmico y el confort adaptativo	53
2.-	La Calidad del Ambiente Interior	
2.1	La Calidad del Ambiente Interior	58
2.1.1	La Calidad del Aire Interior y la ventilación	58
2.1.2	Ventilación y energía	59
2.1.3	El sobrecalentamiento de los espacios	61
2.2.	Sistemas de ventilación. Tipos	62
2.2.1	La ventilación mecánica	63
2.2.2	La ventilación natural	63
2.2.3	La ventilación híbrida	64
2.2.4	Consideraciones sobre la elección del sistema	64
2.2.5	Problemas asociados a los SVM	66
2.3	Contaminantes y tasa de ventilación	67
2.3.1	Los contaminantes	67
2.3.2	La tasa de ventilación	69
2.4	Investigación relacionada con la ventilación	70
2.4.1	Grupos de investigación	70
2.4.2	Proyectos de investigación	71
3.-	Los Sistemas de Ventilación Natural	
3.1	Principios generales	74
3.1.1	Definición	74
3.1.2	La utilización de la VN en edificación	74
3.1.3	Fundamentos físicos de funcionamiento	75
3.1.4	Principios de diseño	76
3.2	Estrategias de ventilación	78
3.2.1	Clasificación	78
3.2.2	Tamaño y tipo de ventanas	81
3.2.3	El papel del clima y el viento en la ventilación natural	83
3.3	Los SVN como medio de ahorro de energía	85
3.4	La ventilación en la normativa actual	86
3.4.1	Investigación y desarrollo de los SVN	87
3.4.2	Regulación internacional	88
3.4.3	Normativa nacional	89
3.5	Herramientas de cálculo y simulación	90
3.6	Selección de casos	93
3.6.1	Soluciones comerciales	93
3.6.2	Edificios	94
4.-	Los edificios de uso educativo en el marco de la sostenibilidad	
4.1	Energía, huella de carbono y sostenibilidad en los edificios de uso educativo	98

4.2	Carácter ejemplarizante de la administración	100
4.3	La calidad del ambiente interior en los edificios de uso educativo	101
4.3.1	La Calidad del Aire Interior en los edificios de uso educativo	102
4.3.2	El sobrecalentamiento del espacio interior en los edificios de uso educativo	103
4.3.3	El confort adaptativo en edificios de uso educativo	104
4.4	Los sistemas de ventilación en edificios escolares	105
4.4.1	Tipos de sistemas de ventilación	105
4.4.2	Contaminantes	106
4.4.3	Tasa de ventilación	107
4.5	Ventilación natural y uso docente	109
4.5.1	La ventilación natural en edificios escolares	109
4.5.2	La ventilación natural en la tradición constructiva de los edificios escolares: Andalucía y otros ejemplos	113

## CAPÍTULO 2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

1.- Oportunidad y retos de la investigación	96
2.- Hipótesis	99
3.- Objetivos y alcance de la investigación	100

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

1.- Metodología	105
2.- Sistemas y recursos	108

## CAPÍTULO 4. LA ARQUITECTURA ESCOLAR EN ANDALUCÍA (Caracterización del modelo de la investigación)

1.- Tipología de edificio demostrador		
1.1	Condiciones de diseño y constructivas	143
1.1.1	Aspectos de diseño específicos	143
1.1.2	Condiciones del entorno inmediato de implantación de la edificación	145
1.1.3	Tipos de centro	143
1.1.4	Tipos de espacios	146
1.1.5	Esquema funcional	146
1.1.6	Calidad del Ambiente Interior	147
1.2	Condiciones de funcionamiento	151
1.2.1	Régimen de uso	151
1.2.2	Condiciones de ocupación	152
1.2.3	Tipo de usuario	153
1.2.4	Densidad de ocupación	153
1.3	Condiciones de uso y mantenimiento	154
2.- Ámbito geográfico y climático		
2.1	Marco geográfico	157
2.2	El clima en Andalucía	157
2.3	Clasificación climática por municipios	158
2.3.1	Clasificación según el CTE	158
2.3.2	Clasificación de los municipios andaluces	159
2.3.3	Análisis de las condiciones de temperatura exterior	160
2.4	Climogramas y cartas bioclimáticas (Olygay y Givoni)	165
2.4.1	El climograma de Olygay	165
2.4.2	La carta bioclimática de Givoni	166
2.4.3	Aplicación a la geografía andaluza	167
3.- Caracterización de la necesidad de un SV alternativo		
3.1	Origen de la necesidad de un SV alternativo	171
3.1.1	Hermeticidad vs ventilación	171
3.1.2	Los edificios no residenciales en el marco normativo español	172

3.1.3	Estudios previos de sistemas de ventilación en uso docente en Andalucía	173
3.1.4	Edificios escolares con SVM	175
3.2	Problemas asociados al uso de SVM en edificios escolares	175
3.2.1	Incremento de los costes	176
3.2.2	Incremento de las emisiones	176
3.2.3	Problemas asociados con la salubridad	176
3.2.4	Volumen e impacto	177
3.3	Viabilidad y ventajas de los SVN	178
3.3.1	Viabilidad	179
3.3.2	Ventajas	179
3.4	Bases para el planteamiento de una solución de ventilación alternativa	179
3.4.1	Exigencias Técnicas a satisfacer por los sistemas de ventilación	180
3.4.2	Consideraciones para el diseño de un sistema de ventilación	181

#### 4.- Parámetros normativos

4.1	Marco normativo actual de referencia	183
4.2	Parámetros de la Calidad del Ambiente Interior	183
4.2.1	Condiciones de Confort Térmico	183
4.2.2	Límites para la CAI	185
4.3	Contaminantes	187
4.3.1	Tipos de contaminantes	187
4.3.2	Límites recomendables para los contaminantes	188
4.3.3	El CO <sub>2</sub> como indicador	191
4.4	Recomendaciones de la OMS	192

### **CAPÍTULO 5. MODELO DE CÁLCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA (Plan experimental 1ª parte: datos para el diseño)**

#### 1.- Condiciones de funcionamiento

1.1	Demanda y consumo de energía	200
1.1.1	Métodos y sistemas	200
1.1.2	Edificio modelo	201
1.1.3	Resultados y validación	201
1.1.4	Análisis y discusión	202
1.1.5	Conclusiones	205
1.2	Calidad del aire	206
1.2.1	Metodología	206
1.2.2	Resultados	213
1.2.3	Análisis y discusión	216
1.2.4	Conclusiones del apartado	222
1.3	Eficacia de los sistemas de ventilación para garantizar la CAI	224
1.3.1	Metodología	224
1.3.2	Resultados	228
1.3.3	Análisis y discusión	229
1.3.4	Conclusiones del apartado	231

#### 2.- Diseño y dimensionado del SVN

2.1	Modelo teórico	235
2.1.1	Consideraciones previas y bases de partida	235
2.1.2	Diseño del aula como unidad de uso y funcionamiento	236
2.1.3	Edificio modelo	240
2.2	Cálculo	242
2.2.1	Metodología	242
2.2.2	Resultados	242
2.2.3	Análisis y discusión	244
2.2.4	Conclusiones sobre el modelo teórico	245
2.3	Diseño del sistema	247
2.3.1	Descripción	247



2.3.2	Modelo final del sistema estándar para aulas	250
2.3.3	Condiciones generales que deben cumplirse para la utilización del sistema estándar	252
<b>CAPÍTULO 6. CASO DE ESTUDIO</b>		
1.- Implantación del SVN. Edificio test		
1.1	Características generales	259
1.1.1	Sistema de calefacción	261
1.1.2	Sistemas de ventilación	261
1.2	Estimación de los consumos y emisiones de CO <sub>2</sub>	266
1.2.1	Consumo de energía primaria y emisiones de CO <sub>2</sub>	267
1.2.2	Costes de los sistemas y emisiones asociadas	267
1.3	Análisis de los datos y discusión	268
2.- Validación. Campaña de medidas en el edificio test (Plan experimental 2ª parte)		
2.1	Campaña de medidas	270
2.1.1	Metodología	270
2.2	Resultados	276
2.3	Análisis y discusión	286
<b>CAPÍTULO 7. RESULTADOS</b>		<b>288</b>
<b>CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES</b>		<b>303</b>
1.- Conclusiones y aportaciones		
2.- Propuestas de mejora y futuras líneas de investigación		
<b>CAPÍTULO 9. TRANSFERENCIA DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN</b>		<b>311</b>

## **CAPÍTULO 1\_ESTADO DEL ARTE**

**MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS EDIFICIOS DE USO EDUCATIVO EN CLIMA MEDITERRÁNEO:  
Aplicación práctica de diseño y cálculo de Sistemas de Ventilación Natural**



## Marco teórico

Los edificios deben ventilarse, renovando el aire del interior, para garantizar la salubridad de los espacios ocupados por las personas (Hazim B Awbi, 1998). Existen diferentes soluciones de ventilación que pueden utilizarse para controlar la Calidad del Aire Interior (CAI). Estas soluciones, dependerán del tipo de edificio, su uso y funcionamiento (H. B. Awbi, 2008), siendo un factor más a tener en cuenta en el diseño de los espacios, por lo que debe evaluarse en los primeros estadios del proyecto (M. (Matheos) Santamouris & Wouters, 2006). A su vez, la CAI está directamente relacionada con el sistema de ventilación utilizado, siendo éste un criterio clave de diseño para su consumo de energía.

Tradicionalmente la renovación del aire de los edificios se ha realizado por medios naturales. Sin embargo, la ventilación mecánica ha sido una solución muy extendida las últimas décadas debido a la simplicidad de su implementación en los edificios y el abaratamiento de las máquinas y los elementos necesarios para su inclusión en las edificaciones, además de un mayor y mejor acceso al suministro eléctrico. Así, la ventilación natural ha quedado relegada a un segundo plano, de manera que incluso, en algunos casos, han desaparecido las referencias a la misma de la normativa (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013). Esto se ha debido también en parte a una mayor dificultad en su diseño y correcto funcionamiento, lo que la hacen menos atractiva para los proyectistas y los promotores (Allard, Santamouris, Alvarez, European Commission. Directorate-General for Energy., & ALTENER Programme., 1998).

Por otro lado, los sistemas de refrigeración se han incluido a partir de las últimas décadas del XX como una prestación “obligada” en los edificios, sinónimo de calidad y confort. Según Santamouris y otros autores, estos sistemas de refrigeración no son más que un “producto” creado por la industria que ha sabido vender el confort y la comodidad como un bien de consumo. Así mismo, han contribuido también el estilo de vida y al estilo arquitectónico universal, en el que no se tiene en cuenta las condiciones del clima, así como el cambio en la cultura del confort, del comportamiento del consumidor y sus expectativas (M. Santamouris, 2007).

La utilización de sistemas pasivos, con los que el edificio preste el confort necesario al usuario con un mínimo consumo de energía, se encuentra en ejemplos de la tradición constructiva, siendo especialmente interesantes aquellas en zonas cálidas en relación a las necesidades de refrigeración. Como ejemplos pueden mencionarse las torres de viento iraníes (Foruzanmehr & Vellinga, 2011), o el patio en la tradición andaluza (Passe & Battaglia, 2015). Los sistemas de ventilación natural son sistemas que permiten mejorar la sostenibilidad de los edificios en la medida en que reducen significativamente los consumos de energía, tanto por su utilización para reducir las cargas térmicas funcionando como un sistema de refrigeración pasiva, como para garantizar la CAI.

En el caso de los edificios escolares, la ventilación y su diseño tienen especial relevancia en cuanto a la calidad del aire, ya que las aulas son espacios de alta densidad de ocupación, donde los volúmenes necesarios de renovación son elevados. En éstas, el principal “contaminante” que se produce es debido al metabolismo de las personas, siendo el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) el principal indicador que se utiliza para determinar el nivel de calidad del aire.

Utilizando sistemas de ventilación natural para controlar la CAI en las aulas, pueden obtenerse, en clima mediterráneo, ahorros en el consumo de energía con respecto a la utilización de sistemas mecánicos de ventilación. Otras ventajas adicionales son la mejora de la salubridad de los recintos, reduciendo los problemas asociados al “síndrome del edificio enfermo”, la reducción de los costes de inversión inicial, funcionamiento y mantenimiento a lo largo de la vida útil del edificio, así como una menor dependencia del suministro de energía, estado de las redes, precios de los combustibles, etc....



## **CAPÍTULO 1.- ESTADO DEL ARTE**

- 1. La sostenibilidad y el desarrollo sostenible**
- 2. La Calidad del Ambiente Interior**
- 3. Los Sistemas de Ventilación Natural**
- 4. Los edificios de uso educativo en el marco de la sostenibilidad**
- 5. Conclusiones del Capítulo 1**

En este primer capítulo se realiza una revisión del estado del arte relacionado con los Sistemas de Ventilación Natural en edificación como estrategia pasiva para la mejora de su sostenibilidad. El Estado del Arte se estructura en cuatro apartados en los que se tratan distintos aspectos relacionados con el objeto de la investigación, según la temática que aborda cada uno: el concepto de desarrollo sostenible y la eficiencia energética, la calidad del ambiente interior, los sistemas de ventilación natural y los edificios de uso educativo. Asociados a cada tema se identifican y analizan trabajos de investigación procedentes de distintas fuentes tales como publicaciones en revistas científicas, proyectos de investigación, libros y manuales, reglamentos y normativas y estudios y documentos publicados por distintos organismos y corporaciones. Se aporta también información relativa a grupos científicos de investigación. En total se incluyen del entorno de 300 referencias en las cuales se basa la investigación.



# 1.- La sostenibilidad y el desarrollo sostenible

## Resumen

En este apartado se establece el marco general en el que se desarrolla la investigación, en lo relacionado con la mejora de la sostenibilidad de los edificios de uso educativo en clima mediterráneo. Para ello, se parte del concepto general de desarrollo sostenible así como de la definición de las diferentes facetas de la sostenibilidad. A continuación, se desarrollan en mayor detalle las cuestiones relativas al ámbito de la edificación y la construcción sostenible, prestando especial atención al concepto de edificio pasivo y a las soluciones pasivas para la mejora de la sostenibilidad en los edificios. En el siguiente apartado se tratan las cuestiones relacionadas con la energía y el concepto de “eficiencia energética”, tratándose en un punto independiente el problema específico de los sistemas de refrigeración en los edificios.

## 1. La sostenibilidad y el desarrollo sostenible

1.1	El desarrollo sostenible .....	41
1.2	La sostenibilidad de los edificios .....	42
1.2.1	La arquitectura bioclimática. Construcción sostenible y arquitectura sostenible .....	43
1.2.2	Mejora de la sostenibilidad con soluciones pasivas .....	45
1.2.3	Arquitectura vernácula y sostenibilidad .....	45
1.3	La eficiencia energética .....	47
1.3.1	El consumo de energía en los edificios. La mejora de la eficiencia energética .....	48
1.3.2	Los edificios de consumo casi nulo .....	50
1.4	La problemática de los sistemas de refrigeración .....	51
1.4.1	Los sistemas de refrigeración y la demanda de energía .....	51
1.4.2	La refrigeración pasiva .....	51
1.4.3	El confort térmico y el confort adaptativo .....	53



## 1.1 El desarrollo sostenible

Según las Naciones Unidas (“Naciones Unidas,” n.d.), el desarrollo sostenible es “El desarrollo que satisface las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades.” Este concepto fue descrito por el Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CMMAD), publicado en 1987 con el título “Nuestro futuro común”, conocido como “Informe Brundtland”. Según éste, la estrategia para el desarrollo duradero en su sentido más amplio tiende a promover las relaciones armoniosas entre los seres humanos entre sí y entre la humanidad y la naturaleza.

Diversos acuerdos internacionales han continuado con su desarrollo. La Declaración de Río (1992) contiene 27 principios. Entre ellos se incluye el concepto de que los seres humanos tienen derecho a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza, así como que el derecho al desarrollo debe ejercerse en forma tal que responda equitativamente a las necesidades ambientales y de desarrollo de las generaciones actuales y futuras. Junto a ambos, la protección del medio ambiente constituye parte integrante del proceso de desarrollo y no puede considerarse en forma aislada. Posteriormente el Protocolo de Kioto (1997) se centra en el calentamiento global y propone reducir los gases de efecto invernadero para los principales países desarrollados y economías en transición. Éste cubre sólo una parte de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial, siendo necesarias reducciones adicionales de emisiones para poder cumplir con el objetivo último de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

En 2015, la ONU (Organización de Naciones Unidas) aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, que cuenta con 17 Objetivos (“Objetivos desarrollo sostenible ONU,” n.d.), entre los que se encuentran la energía asequible y no contaminante, la acción por el clima y las ciudades y comunidades sostenibles. El Acuerdo de París supone un hito histórico en la lucha contra el cambio climático, fundamental para la promoción de un desarrollo bajo en emisiones, resiliente al clima y sostenible. Tiene como objetivo evitar que el incremento de la temperatura media global del planeta supere los 2°C respecto a los niveles preindustriales y busca, además, promover esfuerzos adicionales que hagan posible que el calentamiento global no supere los 1,5°C.



Fig.1. 1 Objetivos de la Agenda 2030 sobre el desarrollo sostenible (“Objetivos desarrollo sostenible ONU,” n.d.)

La Carta de la Tierra (“The Earth Charter,” n.d.) se centra en la transición necesaria a formas de vida sostenibles y al desarrollo humano sostenible, así como en proteger y restaurar la integridad de los sistemas ecológicos de la tierra, con especial preocupación por la diversidad ecológica y los procesos naturales que sustentan la vida. Así mismo, propone el control en la extracción y el uso de recursos no renovables, como minerales y combustibles fósiles, de manera que se minimice el agotamiento y no se causen daños ambientales.

La sostenibilidad se alcanza a distintos niveles: ecológico, económico, social y cultural. El concepto de desarrollo sostenible es aplicable a la sostenibilidad ambiental, urbana, a las ciudades sostenibles, al turismo sostenible, a los edificios sostenibles.... Así, en España el Gobierno (“Ministerio para la Transición Ecológica,” n.d.) establece distintas estrategias, tales como la Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia (EECCCL), que forma parte de la Estrategia Española de Desarrollo Sostenible (EEDS). En el ámbito de los edificios y el entorno urbano

construido se interrelacionan distintos aspectos de la sostenibilidad, como los relativos a los materiales que se utilizan, el uso del agua, o la energía embebida, relacionados con el análisis del ciclo de vida. Junto con esto, la sostenibilidad a nivel social y cultural tiene como objetivo principal ofrecer refugio a los seres humanos optimizando el confort y la salud de los ocupantes, protegiendo los valores sociales, económicos y el conocimiento local.

## 1.2 La sostenibilidad de los edificios

Los edificios sostenibles son aquéllos que proporcionan un entorno habitable y saludable para sus habitantes y satisfacen sus necesidades sin afectar la capacidad de los sistemas ambientales locales, regionales y globales para satisfacer las necesidades de las generaciones futuras" (ECA Urban air indoor environment and human exposure, 2003).

En los últimos años han surgido numerosos "sellos" de diferentes organismos, centrados en el estudio y la clasificación de las nuevas edificaciones en cuanto a su grado de sostenibilidad. Funcionan analizando el edificio según su propia metodología, tras lo que se le asigna al edificio una clasificación en un nivel determinado dentro de una graduación predefinida por el método. Cada uno de ellos tiene sus propios "certificadores" o técnicos especializados en utilizar su método de análisis, para cuya formación ofrece cursos específicos. En general, todos ellos presentan fundamentos parecidos, ya que estudian el grado de sostenibilidad en base a aspectos tales como el consumo de energía y agua, las emisiones de CO<sub>2</sub>, el transporte, los residuos generados en el edificio o el uso de materiales contaminantes en su construcción. Ninguno de ellos es de obligado cumplimiento, aunque su filosofía es trasladar o garantizar una mejor calidad en los edificios que certifican. Entre los más reconocidos a nivel internacional se encuentran BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) ("BREEAM," n.d.), creado por el organismo inglés BRE (Building Research Establishment) ("BRE (Building Research Establishment)," n.d.) en los años '80 y (Gil-Baez et al., 2017a) LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), creado en Estados Unidos (EEUU) por el Green Building Council se implantó en 1993. La Certificación VERDE (Valoración de Eficiencia de Referencia de Edificios) ("Certificación VERDE," n.d.), menos conocida, y reconocida sólo a nivel europeo, se creó por la asociación Green Building Council España (GBCE) para fomentar la creación de un mercado más sostenible en la construcción.



Fig.1.2 Colegio con sello Breeam y ventilación natural. Fuente ("BREEAM," n.d.)

Actualmente, se encuentra también en expansión la certificación de estándares de diseño de edificios. Éstos no se basan en un análisis integral de la edificación como los anteriores, sino que se centran exclusivamente en unos estándares de consumo en energía en los edificios y en las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas. El más conocido, dada la gran labor de difusión que está realizando su plataforma, es el estándar Passivhaus ("Passive House Institute," n.d.). El estándar propone la reducción de la demanda de calefacción de 100 W/m<sup>2</sup> a 10 W, mediante el diseño de edificios con una elevada hermeticidad y grandes aislamientos en la envolvente. La necesidad remanente de calefacción la resuelven aportando aire al interior, que en cualquier caso es necesario para hacer el espacio habitable. El estándar se denomina "pasivo" aunque realmente es "activo", dado que siempre dependerá de una máquina para garantizar el aire mínimo de ventilación. Al igual que las certificaciones anteriores el estándar tiene su propia metodología de cálculo. Así mismo, forma mediante cursos específicos, a los "certificadores" o técnicos especializados en utilizar su método de diseño. En la práctica, se han documentado casos en los que la utilización de este sistema ha dado lugar a problemas debidos al exceso de hermeticidad y consiguiente sobrecalentamiento

de los espacios, dándose el caso de edificios con necesidad de refrigeración ubicados en zonas donde antes no era necesario (Oropeza-Perez & Østergaard, 2014).

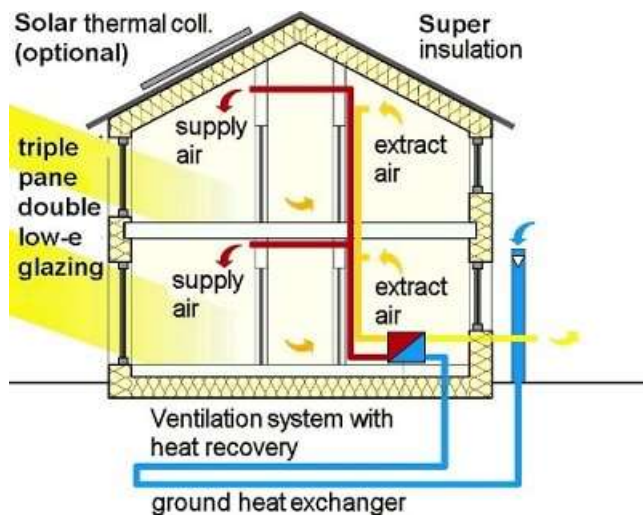


Fig.1.3. Imagen Passivhaus ("Passive House Institute," n.d.)

El origen de este sistema se encuentra en Centroeuropa, donde las necesidades de calefacción son elevadas. Sin embargo, no está suficientemente resuelta su aplicación a zonas con temperaturas más suaves, donde la demanda de calefacción no se asemeja a la del norte de Europa, y el clima, la forma de vida y la propia manera de utilizar los edificios, es diferente. De hecho, otros estudios demuestran que, en clima cálido, se pueden conseguir consumos de energía similares al propuesto por este estándar, por otros medios y sin comprometer el bienestar de las personas (Sassi, 2013).

Como alternativa al estándar Passivhaus, y con un enfoque diametralmente opuesto, se encuentra el propuesto por la plataforma Activehouse ("Active House," n.d.). Se presentan de la siguiente manera:

*"The Active House label is a worldwide quality stamp for comfortable and sustainable buildings. Active House is a vision of buildings that creates healthy and comfortable lives for their occupants without negatively influencing the climate and environment – moving us towards a cleaner, healthier and safer world. An Active House is evaluated on the basis of the interaction between indoor climate conditions, energy consumption and impact on the environment". The Active House Specifications use the adaptive approach to evaluate the thermal environment. The idea behind the method is that people adapt to the outdoor temperature as it rises and falls. We adapt psychologically but also by adjusting our activity, clothing level or by opening or closing windows. The adaptive method uses the outdoor running mean temperature ( $T_{rm}$ ) to vary the comfort limits. The running mean temperature is a weighted average where the temperature from the previous day has the biggest impact, the temperature from two days ago has a smaller influence, and so on."*

### 1.2.1 La arquitectura bioclimática. Construcción sostenible y arquitectura sostenible

En cuanto a la arquitectura, esta se define como el edificio que contiene y protege al hombre y sus actividades. El principio esencial del bioclimatismo es construir con el clima (Jaime Lopez de Asiaín, Rafael González Sandino, José María Cabeza Láinez, Margarita de Luxán García de Diego, Flavio Celis D'Amico, Fernando da Casa Martín, Ernesto Echevarría Valiente, 1997).

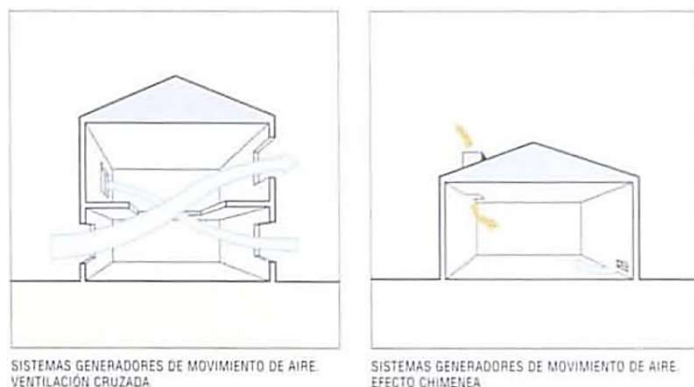
Según la Real Academia de la Lengua (RAE), bioclimático se define como "Relacionado con el clima y los organismos vivos (condiciones bioclimáticas)" y "Dicho de un edificio o de su disposición en el espacio: Que trata de aprovechar las condiciones medioambientales en beneficio de los usuarios (viviendas bioclimáticas. Urbanismo bioclimático)". El medioambiente lo define como "conjunto de circunstancias exteriores a un ser vivo". Así como sinónimo de medio i) "Espacio físico en que se desarrolla un fenómeno determinado. ii) Conjunto de circunstancias o condiciones exteriores a un ser vivo que influyen en su desarrollo y en sus actividades. iii) Conjunto de circunstancias culturales, económicas y sociales en que vive una persona o un grupo humano."

Baruch Givoni, en su primera publicación de 1969 “Man, climate and Architecture” (Givoni, 1969), analiza la relación entre estos tres elementos (hombre, clima y arquitectura). A través de sus climogramas, basados en la carta psicrométrica, traza una zona de confort higrométrico para invierno y para verano, así como define zonas del mismo donde es posible alcanzar el confort mediante la utilización de estrategias pasivas. Sus estudios avanzan sobre otros previos realizados por Victor Olygay, el cual analiza en su libro (Olygay, Frontado, & Clavet, 1998) de título original “Design with climate”, las relaciones entre el edificio y el medio natural que lo envuelve: arquitectura, lugar, forma, clima.... Define también un diagrama en el que se representa en el eje de abscisas la humedad relativa y en la ordenada la temperatura de bulbo seco, trazando una “zona de confort higrométrico” para una persona en reposo y a la sombra. En ella se pueden representar también el efecto del movimiento del aire, de la radiación solar, etc...

A nivel local, encontramos algunas publicaciones de arquitectos centradas en esta materia, como Jaime López Asiaín (López de Asiaín, 1980), Rafael González Sandino (González Sandino & López de Asiaín, 1994), Margarita Luxán (Jaime Lopez de Asiaín, Rafael González Sandino, José María Cabeza Laínez, Margarita de Luxán García de Diego, Flavio Celis D'Amico, Fernando da Casa Martín, Ernesto Echevarría Valiente, 1997), o Francisco Javier Neila (Neila González, 2004; Neila González & Acha Román, 2009). Este último define la construcción sostenible como “aquella que cubre nuestras necesidades de cobijo sin impedir que las generaciones venideras puedan hacerlo también”. Para definir la arquitectura sostenible añade un matiz diferenciador, siendo la que cubre además de necesidades de la construcción, las de los servicios interiores de acondicionamiento y de abastecimiento de agua. Según esto, un edificio sostenible es el que se construye con materiales o conceptos sostenibles, que se acondiciona con energías renovables y que gestiona el agua para reducir su dependencia.

En resumen, podemos hablar de diseño bioclimático de los edificios, arquitectura sostenible y construcción sostenible. Los dos últimos conceptos podrán compartir aspectos similares en cualquier ubicación, estando sin embargo el primero de ellos íntimamente ligado a su entorno geográfico y climático, por lo que deberán establecerse diferentes estrategias en función del clima al que deba adaptarse el edificio.

Publicaciones a nivel internacional señalan como enfoque fundamental para los diseñadores y proyectistas de edificios de baja huella de carbono, el diseño estratégico desde la sostenibilidad del conjunto antes que la eficiencia energética de una instalación concreta (Tymkow, P., Tassou, S., Kolokotroni, M., & Jouhara, 2013). Para ello, deben surgir nuevos diseñadores especializados en edificios sostenibles con conocimientos y habilidades específicas sobre la materia (M. Santamouris, 2007). Como ejemplo, vemos a Kolokotroni et al. realizar recomendaciones para el diseño de viviendas bioclimáticas en clima mediterráneo (Grecia) (Kolokotroni & Young, 1990). A nivel nacional no se ha encontrado un número relevante de publicaciones especializadas, ni un reflejo normativo de la utilización del clima en la normativa técnica actual. Ciertamente es que la norma es prestacional, pero no se encuentran fácilmente manuales de diseño bioclimático que permitan el desarrollo en los proyectos de soluciones alternativas a las que se reflejan en los DBs del CTE. En el caso concreto de Andalucía, la publicación de 1997 Arquitectura y Clima en Andalucía: Manual de Diseño (Jaime Lopez de Asiaín, Rafael González Sandino, José María Cabeza Laínez, Margarita de Luxán García de Diego, Flavio Celis D'Amico, Fernando da Casa Martín, Ernesto Echevarría Valiente, 1997), es de gran interés. Proporciona recomendaciones de diseño desde el enfoque bioclimático y utiliza los diagramas de Givoni y Olygay para caracterizar los distintos climas de Andalucía. Sin embargo, su utilización no se encuentra especialmente extendida en lo que se ha podido observar.



**Fig.1.4.** Estrategias de diseño bioclimático. Izda.) Ventilación cruzada. Dcha.) Ventilación por efecto chimenea. (fuente: reproducido de (Jaime Lopez de Asiaín, Rafael González Sandino, José María Cabeza Laínez, Margarita de Luxán García de Diego, Flavio Celis D'Amico, Fernando da Casa Martín, Ernesto Echevarría Valiente, 1997)).

Diseñar con el clima se encuentra presente en las directivas europeas de eficiencia energética en los edificios desde su primera versión. Así la Directiva Europea (DE) 2002/91/CE (Europeo, Consejo, & Uni, 2003), contemplaba que “Las medidas para fomentar la mejora de la eficiencia energética de los edificios deben tener en cuenta las condiciones climáticas y las particularidades locales, así como el entorno ambiental interior y la relación coste-eficacia. Dichas medidas no deben contravenir otros requisitos esenciales aplicables a los edificios, tales como la accesibilidad, la prudencia y la utilización a que se destine el edificio”. En la misma línea, la Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia (ECCEL) aborda diferentes medidas que contribuyen al desarrollo sostenible (“Ministerio para la Transición Ecológica,” n.d.), estableciendo entre los distintos objetivos a alcanzar para el sector residencial, comercial e institucional, la mejora de la eficiencia energética en los edificios, tanto en la envolvente edificatoria como en el equipamiento, la promoción de la utilización de energías renovables y el desarrollo de programas ejemplarizantes en los edificios públicos.

### 1.2.2 Mejora de la sostenibilidad con soluciones pasivas

La reducción de la demanda de energía de los edificios puede lograrse reduciendo el consumo de las instalaciones y de los sistemas activos consumidores de energía, o bien utilizando soluciones pasivas de diseño y construcción. Diversas publicaciones analizan este aspecto. Así, Ahmad et al. analizan en (Ahmad, Thaheem, & Anwar, 2017) el diseño de edificios verdes y sostenibles, utilizando una combinación de diferentes técnicas y sistemas y resaltando la importancia de los modelos de diseño en la optimización de la sostenibilidad. Identifican los sistemas pasivos como aquéllos que no dependen de la electricidad o de sistemas mecánicos para funcionar, siendo la definición opuesta la de los sistemas activos.

Dentro de los elementos pasivos, la envolvente es el que mayor interés ofrece para reducir el consumo de energía y mejorar el confort. Aunque se tiende a asociar el ahorro de energía con ahorrar energía del sistema de calefacción, la mejor solución dependerá de las condiciones climáticas y de la instalación que mayor consumo presente (Givoni, 1969; Olgyay et al., 1998). Según Awbi (M. Santamouris, 2007) un edificio bien adaptado al clima es aquel que protege al ocupante frente a las condiciones externas extremas sin crear condiciones internas incómodas. De este modo, un diseño adecuado para un clima determinado, puede no serlo para otro tipo de clima. Un edificio que se adapta al clima es aquél que tiene un buen aislamiento, ganancias solares pasivas adecuadas y controladas con elementos móviles de protección solar y aperturas de ventilación. De este modo, se reduce la necesidad tanto de calefacción como de refrigeración. Una arquitectura aceptable debería garantizar que el edificio sea lo suficientemente confortable sin ningún sistema de calefacción ni refrigeración, siendo esto posible en la mayoría de los casos con soluciones pasivas.

La adaptación del edificio al medio se obtiene fundamentalmente combinando distintas estrategias: aislamiento térmico, protecciones solares y aperturas de ventilación, estando todas ellas relacionadas con la envolvente. Otras soluciones pasivas para la adaptación de los edificios al clima son analizadas por Hoof et al. (Hooff et al., 2016) como la ventilación natural o el sombreado en las ventanas.

En la misma línea, Santamouris y Wouters, definen un edificio pasivo (M. (Matheos) Santamouris & Wouters, 2006) (edificio adaptativo o “slow building”), como aquel en el que se reduce el consumo de energía fósil hasta el punto de que la mayor parte de la energía necesaria para su funcionamiento es energía renovable producida “in situ”. Para ello, definen determinadas características que deberían tener estos edificios tales como ventanas practicables para proporcionar ventilación natural, elevados niveles de masa térmica para estabilizar las temperaturas interiores en olas de frío o calor, mayor control del usuario para permitirle utilizar estrategias de confort adaptativo, o pieles adaptativas donde las sombras y las protecciones solares se diseñen para maximizar el potencial de protección del edificio frente al viento y el sol. Esto proporcionaría edificios con ambientes interiores más saludables gracias al aire fresco y más limpio introducido a través de las ventanas y con un bajo consumo de energía, dado que el propio edificio tendría un papel importante en el control del clima interior.

### 1.2.3 Arquitectura vernácula y sostenibilidad

La arquitectura tradicional siempre ha tenido en cuenta los aspectos del clima de su entorno para garantizar el confort en el interior de los edificios. Existen ejemplos en todas las latitudes, tanto de clima frío como de clima

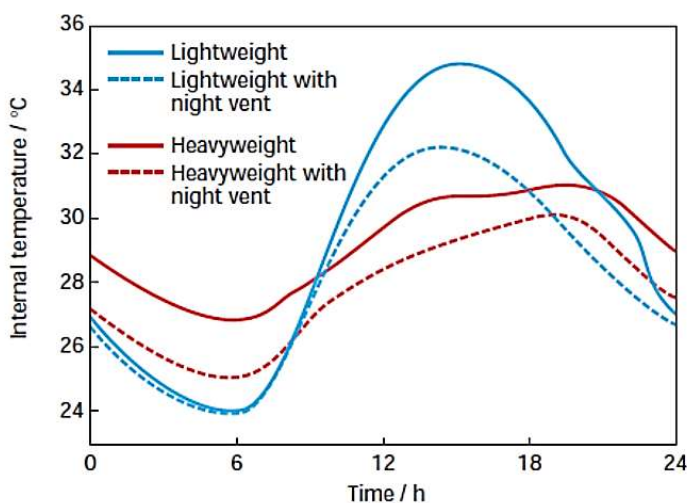


templado. Sin embargo, según reflexionan Foruzanmehr y Vellinga (Foruzanmehr & Vellinga, 2011), se da la situación paradójica de que la tradición de la arquitectura vernácula se está perdiendo al ser desplazada por sistemas más modernos y sin embargo, se citan en la literatura académica como ejemplos modélicos de práctica ambiental. Estos autores analizan las causas de la pérdida en el uso de los sistemas de refrigeración pasivos (torres de viento) de la arquitectura vernácula de Irán.



**Fig.1.5.** Torres de viento de Irán. (fuente: reproducido de (Passe & Battaglia, 2015))

Las torres de viento y otros sistemas de ventilación natural son analizados en diferentes estudios, por la reducción de consumo que supone en el edificio tanto para ventilar y garantizar la calidad del aire, como para su uso como técnica de refrigeración pasiva. Masoumi et al. (Masoumi & , Nasim Nejati, 2016) abundan en este aspecto, analizando la cuestión de la organización urbanística de la ciudad de Bushehr en Irán y su utilización de la ventilación natural en el diseño. Otras publicaciones analizan edificios existentes que han hecho un uso inteligente en su diseño de la ventilación natural. En “Designing spaces for natural ventilation: an architect's guide” (Passe & Battaglia, 2015), Passe y Bataglia analizan desde las torres de viento iraníes ya mencionadas a obras de Frank Lloyd Wright, Louis Khan o Alvar Aalto. Balocco y Grazzini se centran en el análisis de sistemas de ventilación natural en edificios históricos en Italia, tales como el Palacio Pitti de Florencia (Balocco & Grazzini, 2010) y otras tres villas en la zona de Trento. En estos, soluciones basadas en el efecto chimenea, la inercia térmica de las envolventes y elementos almacenadores de calor (heat storage), son utilizadas como soluciones pasivas de refrigeración.



**Fig.1.6.** Efecto de la masa térmica y la tasa de ventilación en la temperatura interior. (fuente: reproducido de (CIBSE, 2005))

En el libro “Advances in passive cooling” (M. Santamouris, 2007), Santamouris reflexiona sobre las ventajas que ofrece la recuperación de soluciones de la arquitectura vernácula en la mejora de la sostenibilidad de los edificios, proponiendo una vuelta a este tipo de construcción típica de cada localización para promover los edificios de bajo

consumo o pasivos. Propone lo que define como edificios “modernos vernáculos”, que combinen las lecciones de la edificación tradicional con la tecnología moderna para proporcionar edificios verdaderamente sostenibles: la arquitectura vernácula como paradigma del diseño pasivo. Entre las características que se deberían recuperar propone que sean edificios que contemplen ciertos aspectos recogidos en la Tabla 1.1 siguiente, proponiéndose de este modo edificios durables y autónomos frente a los efectos del cambio climático, a la vez que con un perfil de consumo energético muy bajo, que en última instancia podrá ser producido “in situ” con fuentes renovables. En la Tabla 1.1 se han recogido las recomendaciones de las publicaciones (M. (Matheos) Santamouris & Wouters, 2006; M. Santamouris, 2007), para diseñar edificios adaptativos que recuperen las estrategias de la arquitectura vernácula sostenible.

**Tabla 1.1.** Resumen de características para edificios pasivos. (fuente: elaboración propia a partir de los datos de (M. (Matheos) Santamouris & Wouters, 2006) y (M. Santamouris, 2007))

CARACTERÍSTICAS PARA EL DISEÑO DE EDIFICIOS PASIVOS	
1.	Ventilados naturalmente (ventanas practicables para proporcionar ventilación natural)
2.	Con pieles adaptativas donde las sombras y las protecciones solares se diseñen para maximizar el potencial de protección del edificio frente al viento y el sol
3.	Con mayor control del usuario para permitirle utilizar estrategias de confort adaptativo
4.	Robustos
5.	De elevada inercia térmica (elevados niveles de masa térmica para estabilizar las temperaturas interiores en olas de frío o calor)
6.	Que permitan el almacenamiento de energía para que puedan reaccionar ante los excesos del clima tanto frente a olas de calor como en el caso de frío, de manera que los edificios sean independientes de las fluctuaciones del coste de la energía o de una posible falta de suministro

### 1.3 La eficiencia energética

La sostenibilidad de los edificios no debe confundirse con su eficiencia energética. La eficiencia energética no es más que uno de los recursos posibles que se pueden utilizar para hacerlos más sostenibles, junto con otros como la utilización de materiales reciclables o el uso de fuentes de energía renovables.

El diseño de edificios sostenibles es un proceso complejo en el que afectan numerosas variables de diseño, cada una de ellas con un determinado rango de valores. Diversos estudios se centran en buscar modelos que permitan la calibración de su sostenibilidad. Por ejemplo, Wu y Skitmore optimizan un modelo para diseñar edificios sostenibles (Wu, Ng, & Skitmore, 2016), en el que se minimice el consumo y se maximiza el confort, analizando el coste del ciclo de vida además del consumo de energía y el nivel de confort en relación a la calidad del ambiente interior. Para ello, tienen en cuenta el consumo anual de energía, el voto medio estimado de los ocupantes, las concentraciones de CO<sub>2</sub> y el nivel de iluminación.

Existe cierta tendencia a la simplificación y se suele identificar la eficiencia energética con los sistemas mecánicos que consumen energía. Según Lee et al. (Lee, Hong, Piette, & Taylor-lange, 2015), para mejorar el consumo de energía en los edificios, se suelen analizar en general medidas de conservación de energía, que incluyen sensores de luz natural para el control de la iluminación interior, el refuerzo del aislamiento, la sustitución de las unidades de tratamiento de aire (UTAs) por otras de mayor eficiencia energética o la instalación de iluminación tipo LED. Sin embargo, el primer paso para conseguir un edificio de consumo reducido se encuentra en el diseño del propio edificio. En este sentido, como se ha visto en el apartado anterior, el diseño de la envolvente tiene un gran peso en la demanda de energía del edificio. Así, mediante la utilización de elementos exteriores, como por ejemplo sombras, se puede reducir significativamente la demanda de refrigeración, tal como se expone en numerosas publicaciones (Ahmadkhani Maleki, 2011; Balogun, Morakinyo, & Adegun, 2014; Carmen María Calama-González, Rafael Suárez, 2018). Trabajando en la propia composición de la envolvente también se obtienen reducciones en la demanda, bien con soluciones convencionales (Aslani, Bakhtiar, & Hadi, 2019; Gil-Baez, Padura, & Huelva, 2019), con cubiertas verdes (M. Santamouris, Pavlou, Doukas, & Mihalakakou, 2007) o incluso con nuevos materiales como los superaislantes (Cuce, Cuce, Wood, & Riffat, 2014).

Como líneas de investigación interesantes, actualmente en desarrollo, que analizan nuevas vías para reducir el consumo de los edificios, destacan por un lado las orientadas en el análisis del ciclo de vida de los edificios (Desideri et al., 2014) (LCA; Life Cycle Assessment) o de alguna de sus partes, como la envolvente (Aslani et al.,

2019) y por otro la que se centra en los sistemas de almacenamiento de energía (Jesús Lizana, Chacartegui, Barrios-padura, & Manuel, 2017) y los materiales de cambio de fase (Álvarez, Cabeza, Ruiz-pardo, Castell, & Antonio, 2013; Bastani, Haghighat, & Kozinski, 2015).

La DE 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2002, relativa a la eficiencia energética en los edificios (Europeo et al., 2003) establecía entre sus consideraciones que *“El fomento de la eficiencia energética constituye una parte importante del conjunto de políticas y medidas necesarias para cumplir lo dispuesto en el Protocolo de Kioto, y debe estar presente en todas las medidas que se adopten con el fin de dar cumplimiento a nuevos compromisos.”* Para normalizar estas cuestiones y que fueran tenidas en consideración por los estados miembros, esta Directiva definía el concepto de certificado energético, su metodología de cálculo, etc...

### 1.3.1 El consumo de energía en los edificios. La mejora de la eficiencia energética

Los edificios son los mayores consumidores de energía a nivel mundial, suponiendo, según la Agencia Internacional de la Energía (“IEA (International Energy Agency),” n.d.), del entorno de un tercio de la energía final que se consume y estimándose en hasta el 40% por las DE de 2010 y 2018 (Comisión Europea, 2010, 2018). Así mismo, constituyen una fuente importante de emisiones de CO<sub>2</sub>. Conseguir una reducción significativa de su consumo y emisiones, según la Agencia Internacional de la Energía (International Energy Agency IEA) en su documento “Transition to sustainable buildings: Strategies and opportunities to 2050”, es un objetivo político difícil pero alcanzable (International Energy Agency, 2013).

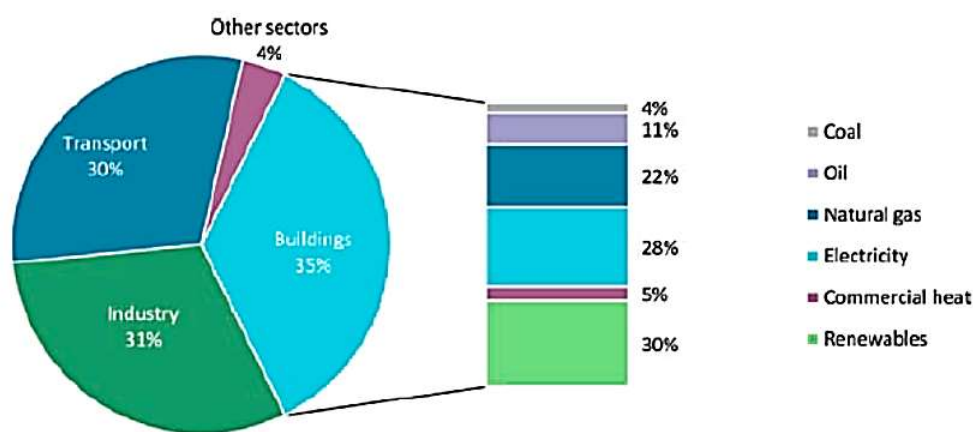


Fig.1.7. Energía final consumida según “Transition to sustainable buildings: Strategies and opportunities to 2050” IEA (International Energy Agency, 2013).

La tendencia de consumo de energía primaria del sector de los edificios, es creciente en las economías desarrolladas. Esto lo analizan y exponen tanto las directivas europeas como trabajos de investigación como el de Perez-Lombard (Pérez-Lombard, Ortiz, & Pout, 2008). Según la DE 2002/91 (Europeo et al., 2003) “El sector de la vivienda y de los servicios, compuesto en su mayoría por edificios, absorbe más del 40% del consumo final de energía en la Comunidad y se encuentra en fase de expansión, tendencia que previsiblemente hará aumentar el consumo de energía y, por lo tanto, las emisiones de dióxido de carbono”. Según Pérez Lombard (Pérez-Lombard et al., 2008), son varias las razones por la que el sector de los edificios presenta elevados consumos de energía. Entre estas se encuentran el incremento de la población, una mayor dependencia de los equipos del edificio, una mayor exigencia en cuanto a los niveles que se consideran de confort y una forma de vida en la que se pasa mayor tiempo en los interiores. Otros autores como Santamouris, comparten este punto de vista relacionando los consumos en los edificios con lo que denomina “estilo de vida y arquitectónico universal”, en el que no se tiene en cuenta las condiciones del clima. En una de sus publicaciones, pone el ejemplo de un edificio de oficinas en Grecia (M. Santamouris, 2007), con un diseño “universal” de fachada acristalada y con un consumo energético de 200 kWh/m<sup>2</sup> año, cuando un edificio convencional podría estar en el entorno de los 40 kWh/m<sup>2</sup> año y uno bioclimático en 5 kWh/m<sup>2</sup> año. Como paradoja, además, las condiciones de confort eran peores en el primero de ellos, así como la CAI. Según el mismo autor (M. Santamouris, 2007), la filosofía subyacente en los estándares internacionales promueve edificios refrigerados mecánicamente, así como impone a los proyectistas sus estándares y soluciones.



Estos derivan de ensayos de laboratorio y tienden a soluciones estáticas para unas condiciones interiores predeterminadas. Este enfoque es opuesto al del confort adaptativo, sobre el que se profundiza en un apartado posterior.

La mejora de la eficiencia energética de los edificios es una de las principales herramientas para limitar la emisión de gases de efecto invernadero y reducir los efectos del cambio climático. Para ellos, es fundamental conocer en primer lugar su régimen de funcionamiento y el patrón de consumo energético asociado. Según Chenari et al. (Chenari, Dias Carrilho, & Gameiro da Silva, 2016), los sistemas HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) son los principales consumidores de energía en los edificios. La Directiva UE 2018/844 estima que casi el 50% del consumo de energía final de la Unión se destina a calefacción y refrigeración, de la cual el 80% se consume en edificios. Junto con este consumo, los edificios requieren energía para la producción de agua caliente sanitaria y el uso de aparatos eléctricos (Khan, Su, & Riffat, 2008).

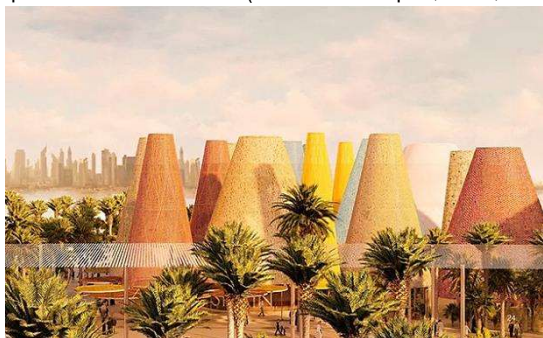
En relación a los sistemas de climatización (HVAC), se demuestra que consumen entre el 60% y el 70% del total de energía utilizada en los edificios no industriales (Krawczyk, 2014). De esta energía, entre el 30% y el 50% del consumo es debido a la ventilación e infiltraciones (Khan et al., 2008). Según Krawczyk (Krawczyk, 2014) el tipo de energía que se consume está directamente relacionado con el clima, de modo que entre el 60% y el 70% se consume para calefacción en climas fríos como Reino Unido y Polonia, mientras que en clima cálido se usa menos para calefacción (7% en México). En este segundo caso, se emplean más los sistemas de refrigeración que consumen energía eléctrica.

A esto se puede añadir la tendencia en el incremento del uso de sistemas de refrigeración. Lam et al. (D. H. W. Li, Pan, & Lam, 2014), comparan los bioclimas del siglo XX y XXI, observando una reducción de la falta de confort en invierno y un incremento de esta en verano, produciéndose una tendencia de incremento en el uso de sistemas de refrigeración tanto en climas fríos como cálidos. Dado que se alimentan con energía eléctrica, esto producirá previsiblemente una sobrecarga en la demanda de la red así como un incremento en las emisiones de CO<sub>2</sub>. Esta circunstancia también se recoge en las Directivas europeas de eficiencia energética, las cuales instan a tener en cuenta el clima de la zona en el diseño de los edificios, reduciendo el uso de sistemas de refrigeración y utilizando soluciones bioclimáticas (Europeo et al., 2003).

Por otro lado, el comportamiento de los ocupantes tiene un impacto significativo, del orden de 2 a 1 según Haldi et al. (Haldi, Robinson, & Haldi, 2011), en la demanda de energía de los edificios. Yousefi et al. (Yousefi, Gholipour, & Yan, 2017) investigaron la influencia del estilo de vida de los ocupantes en el comportamiento energético de edificios residenciales en distintas localizaciones y con diferentes envolventes. Según ellos, el comportamiento de los ocupantes tiene un impacto significativo en el uso de energía térmica del edificio, especialmente en áreas de clima caluroso, y puede modificar las cargas de calefacción y refrigeración en aproximadamente un 90%. Igualmente, identificaron importantes fluctuaciones en los consumos de energía térmica derivados de no considerar adecuadamente las cargas de ocupación, así como un aumento en el consumo debido al tipo de ventana utilizado, recomendando tener en cuenta el comportamiento del usuario en las evaluaciones que se hagan sobre la sostenibilidad de los edificios. Hong et al. profundizan en este aspecto (Hong, Taylor-lange, Oca, Yan, & Corgnati, 2016), concluyendo que actualmente el conocimiento real del comportamiento del usuario es insuficiente, tanto en el diseño del edificio, como en el patrón de uso y funcionamiento como en el caso de rehabilitaciones, de modo que en el análisis y las modelizaciones se tiende a realizar simplificaciones. En este estudio, se exponen los avances más recientes y los obstáculos más habituales en la modelización del comportamiento de los ocupantes y su cuantificación en el uso de energía del edificio.

Visto lo anterior, una estrategia de gran potencial para reducir el consumo de los edificios debe basarse en primer lugar en el análisis y conocimiento del patrón de consumo de los sistemas HVAC (por ser los mayores consumidores) y en segundo lugar, en la identificación de soluciones que permitan reducir la demanda de energía para el acondicionamiento interior de los espacios (refrigeración, calefacción y ventilación) (Attia & Carlucci, 2015). Según Rana et al. una forma de reducir el consumo de energía de los sistemas HVAC (Rana, Kusy, Wall, & Hu, 2015) sería limitar el uso de la calefacción en invierno y de la refrigeración en verano. Sin embargo, si los usuarios consideran no satisfecho su confort, pueden llegar a anular los controles de los sistemas, por lo que la medida no sería útil a su propósito original.

Otro modo de minimizar el consumo de energía asociado al ambiente interior se basaría en la utilización de nuevos diseños de edificios y nuevos sistemas de acondicionamiento, teniendo en cuenta las condiciones climáticas y las particularidades locales (Comisión Europea, 2010; Europeo et al., 2003).



**Fig.1.8.** Imagen de nuevos sistemas de acondicionamiento en los edificios, nuevos diseños (pabellón de España en Dubai 2019. (fuente: <https://www.accioncultural.es/es/ExpoSpain2020>)

Finalmente, la sustitución del consumo de energía fósil por energía renovable no reduce el consumo en sí, pero sí las emisiones. En cualquier caso, la energía que mejor se ahorra es la que no se necesita, por lo que una primera pauta para mejorar la eficiencia sería limitar la necesidad de los sistemas mecánicos en los edificios, ya que la producción de renovables tienen otros impactos en el medio ambiente relacionados con el análisis del ciclo de vida del sistema en sí. A esto hay que añadir, tal como recogen en su libro Passe y Battaglia, que la única manera de abastecer el sistema energético con renovables es reduciendo al mínimo la necesidad de consumo de los edificios (Passe & Battaglia, 2015).

### 1.3.2 Los edificios de consumo casi nulo

Avanzando en el camino marcado por la directiva anterior (Europeo et al., 2003), la Directiva de eficiencia energética en los edificios DE/31/UE 2010 (Comisión Europea, 2010), acuña el término Edificio de Consumo Casi Nulo (NZEB Net Zero Energy Building). Según su artículo (8) *“Las medidas para mejorar más la eficiencia energética de los edificios deben tener en cuenta las condiciones climáticas y las particularidades locales, así como el entorno ambiental interior y la rentabilidad en términos de coste-eficacia”*, por lo que no existe una definición concreta y homogénea de este para todos los países de la Unión Europea, ya que cada uno tendrá sus propias condiciones.

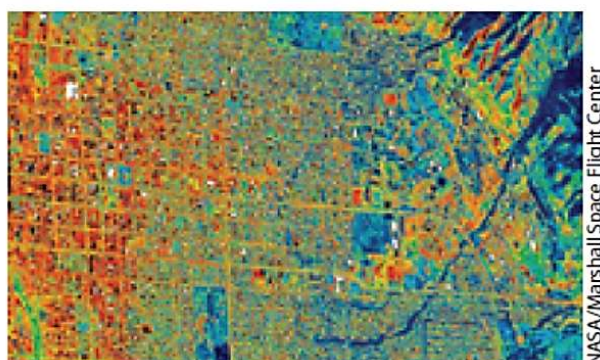
Los edificios de consumo casi nulo se enfocan en general como una solución integral ante los problemas de ahorro de energía, protección del medio ambiente y reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el sector de la edificación (Deng, Wang, & Dai, 2014). En España, el Código Técnico de la Edificación (CTE) (Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Ministerio de Fomento, n.d.) en su versión actual (junio de 2018 con comentarios de 2018) los define como “Edificio de consumo de energía casi nulo: edificio que cumple con las exigencias reglamentarias establecidas para edificios de nueva construcción en las diferentes secciones de este Documento Básico”. Determinados estudios intentan definirlo y parametrizarlo, como Attia y Carlucci (Attia & Carlucci, 2015) que analizan diferentes modelos de confort térmico en edificios residenciales en clima cálido. Deng et al. (Deng et al., 2014) realizan una amplia revisión de la literatura relacionada con este tema, presentando las diversas definiciones, medidas de eficiencia energética, metodologías de análisis y herramientas que se utilizan, incluyendo el análisis de ciclo de vida como sistema que puede tener un papel importante en promover una buena definición de los edificios de consumo casi nulo y basando su funcionamiento en el uso de renovables. Otros estudios vinculados a proyectos de investigación, como el proyecto “ZEMedS-promoting renovation of schools in a Mediterranean climate up to nearly zero-energy buildings” (Dra. Niki Gaitani, 2014), (programa Intelligent Energy Europe) analizan un uso concreto, como es el de edificios de uso educativo, en cuanto a su potencial de renovación en las regiones de la costa mediterránea europea y con el enfoque de Edificios de Consumo Casi nulo.

## 1.4 La problemática de los sistemas de refrigeración

### 1.4.1 Los sistemas de refrigeración y la demanda de energía

Tal como se ha esbozado en el apartado anterior, el cambio climático afectará previsiblemente al clima y a la demanda de energía, que tendencialmente reducirá la demanda de calefacción e incrementará la de refrigeración a nivel global (D. H. W. Li et al., 2014). Habrá más demanda de electricidad cuyo consumo incrementará las emisiones. A su vez, las ciudades como islas de calor también incrementarán los requerimientos de aire acondicionado (ECA Urban air indoor environment and human exposure, 2003). Ya la DE 2002/91/CE (Europeo et al., 2003) consideraba este como un aspecto importante, incorporando en su articulado la siguiente cuestión: *“En los últimos años se ha observado un aumento del número de sistemas de aire acondicionado en los países europeos meridionales. Esto da lugar a problemas importantes en las horas de máxima sobrecarga, aumentando el coste de la electricidad y perturbando el balance energético de esos países. Debe darse prioridad a estrategias que mejoren el rendimiento térmico de los edificios durante el verano. Para ello debe propiciarse el desarrollo de técnicas de enfriamiento pasivo, fundamentalmente las que mejoran las condiciones ambientales interiores y el microclima alrededor de los edificios.”*

**Fig.1.9.** Isla de calor. Reproducido de (EPA, 2017) (imagen tomada en Utah el 13 de Julio de 1998. Las áreas blancas están en el entorno de los 70°C y las azul oscuro en 30°C. La superficie urbana más caliente (izquierda de la imagen) y las superficies más frías están a la derecha en las laderas

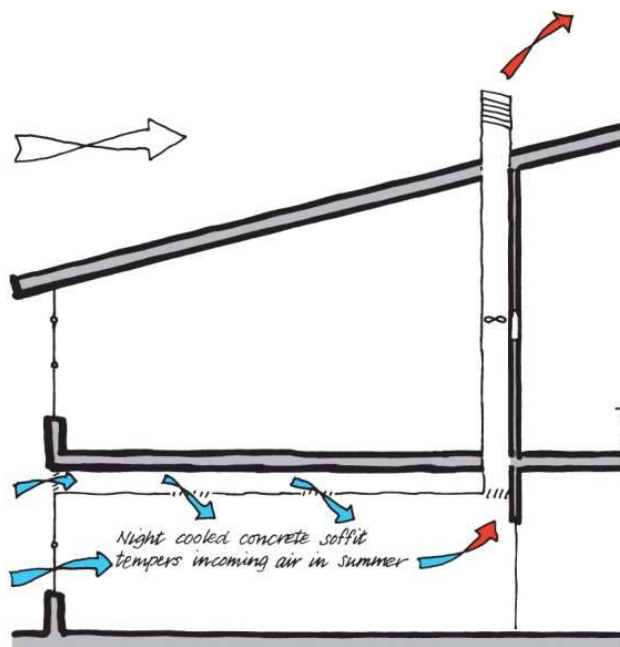


### 1.4.2 La refrigeración pasiva

Los sistemas de ventilación natural funcionan sin usar electricidad o con un uso mínimo, posibilitando la reducción de consumo de los edificios así como de la huella de carbono asociada a los mismos. Numerosos estudios los identifican como una tecnología sostenible, eficiente energéticamente y limpia. (Chenari et al., 2016; Heiselberg, 2017), que además proporciona un ambiente más saludable (Oropeza-perez, Alberg, & Østergaard, 2014). Estos sistemas contribuyen en la obtención de una adecuada CAI manteniendo un estándar de confort sin consumo eléctrico o con un consumo mínimo, siendo este efecto aún mayor en climas con temperaturas moderadas (Fordham, 2000; Passe & Battaglia, 2015).

Estos sistemas se pueden emplear para garantizar la calidad del aire pero también como estrategia de refrigeración pasiva, sin consumo eléctrico, o para reducir las necesidades de refrigeración en los edificios. Parte de las ganancias de calor interno son absorbidas por superficies internas que tienden a ser más frías que el aire de la habitación, en invierno, pero también en verano si el espacio se enfría durante la noche (Carrilho & Linden, 2016). Cuando se utilizan estrategias para conseguir este efecto conscientemente utilizando la ventilación, se habla de estrategia de refrigeración nocturna. Según Carrilho et al., si consideramos una temperatura promedio de la superficie de la habitación que es 4-5°C más baja que las superficies de las fuentes de calor (ropa, piel y equipos de oficina), aproximadamente la mitad de este calor contribuirá directamente a elevar la temperatura del aire del espacio, siendo el resto absorbido por la masa térmica. Esta ganancia de calor sensible directo eleva la temperatura interior en aproximadamente 8°C. En invierno, esto significa que, si la temperatura del aire exterior es de 12°C, la temperatura interna del espacio será de 20°C, solo usando el calor de las ganancias internas típicas. Por lo tanto, en invierno este calor se puede aprovechar con hermeticidad y aislamiento del edificio para reducir las pérdidas de calor a través de la envolvente. La situación es simétrica en verano, de modo que si la temperatura externa es de 25°C, proporcionar la ventilación necesaria solo para respirar dará lugar a una temperatura interna del aire superior a 33°C. Para reducir la temperatura interna a, digamos, 27°C, se requiere una tasa de ventilación del orden de 7 renovaciones hora. Alcanzar este objetivo de enfriamiento por ventilación en la estación suave y cálida es el desafío de la ventilación natural (Carrilho & Linden, 2016).

El Annex 62 de la IEA, desarrollaba este concepto dentro del “Energy in Buildings and Communities Programme” (IEA-EBC, n.d.). Esta estrategia se denomina “ventilative cooling” y se definió en 2012 a través de la plataforma internacional de ventilación “Venticoool” (Venticoool, 2018). Las últimas conclusiones se publicaron en marzo de 2018 en el documento “Ventilative Cooling Design Guide” Energy in Buildings and Communities Programme, IEA (Energy in Buildings and Communities Programme, 2018). Se aporta entre los documentos una herramienta para evaluar el potencial de utilización de la refrigeración ventilativa en los edificios.



**Fig.1.10.** Night ventilation. (fuente: <http://www.passivent.com> (“Passivent,” n.d.))

Diversos estudios, han analizado cómo mitigar el efecto del calor en los edificios con independencia de sistemas mecánicos de refrigeración (Cook & Short, 2017; Flourentzou, Pantet, & Ritz, 2017; Schulze & Eicker, 2013). Otros, como Oropeza et al. (Oropeza-perez et al., 2014; Oropeza-Perez & Ostergaard, 2014; Oropeza-Perez & Østergaard, 2014), muestran las posibilidades de la ventilación natural en este sentido en clima templado. Faggianelli et al. (Faggianelli, Brun, Wurtz, & Muselli, 2014) investigaron el efecto de las brisas como mejora de la ventilación cruzada en la costa mediterránea. Soebarto y Bennetts analizan el confort térmico de los usuarios de viviendas con ingresos de bajos a medios y su respuesta en época de verano en el sur de Australia. Muestran cómo la utilización de sistemas de refrigeración mecánica era la solución menos preferida, debido a la repercusión en la factura eléctrica, utilizándose preferentemente otras soluciones pasivas (como ventiladores de techo, utilización de ventanas practicables, o la adaptación al clima con el propio vestuario). En este estudio se pone en valor la importancia de proporcionar al usuario en el diseño de los edificios y los espacios soluciones pasivas suficientemente flexibles que puedan ser utilizadas con preferencia a los sistemas mecánicos de refrigeración (Soebarto & Bennetts, 2014). En otras latitudes de clima más frío también se analiza su potencial. Por ejemplo, en Holanda se estudia el cambio climático y el estrés por calor (Rodgers & Straub, 2015) y cómo afecta a las personas que habitan las ciudades. El trabajo presentado por Rodgers y Straub forma parte de un estudio orientado a hacer los entornos urbanos más resilientes al clima extremo. Entre las distintas recomendaciones que se realizan se encuentran tales como la utilización de sombras o el uso de materiales con elevada reflexión solar. Junto con las anteriores, otras recomendaciones para evitar el sobrecalentamiento de los espacios interiores se basan en hacer un adecuado uso de la ventilación natural, así como el diseño de ventanas practicables.

Estas soluciones se pueden utilizar en todo tipo de edificios. Kolokotroni et al estudiaron soluciones de refrigeración pasiva y nocturna en oficinas en clima moderado (Birtles, Kolokotroni, & Perera, 1996; Kolokotroni, Webb, & Hayes, 1998) y en edificios de uso educativo (Kolokotroni, Ge, & Katsoulas, 2002; Kolokotroni, Perera, Azzi, & Virk, 2001). También estudian el comportamiento post-ocupacional en edificios de bajo consumo de energía. Otros, como Medved et al (Medved, Babnik, Vidrih, & Arkar, 2014) estudian un algoritmo para la optimización de los sistemas de free-cooling de refrigeración nocturna, aplicándolo al caso de oficinas.

Sin embargo, estos sistemas no están siendo aún aplicados de manera generalizada en el diseño de los edificios, debido a la poca información existente suficientemente accesible. Otro motivo puede ser el hecho de que existen diversos manuales muy enfocados a la formulación matemática y el fundamento físico, orientados a los ingenieros, mientras que aún no hay suficientes manuales más prácticos que el arquitecto pueda incorporar fácilmente en su diseño (Passe & Battaglia, 2015).

### 1.4.3 El confort térmico y el confort adaptativo

Según ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) (American Society of Heating refrigerating and air conditioning engineers, 2004) el confort térmico es esa condición mental que expresa satisfacción con el entorno térmico y tiene una evaluación subjetiva. Según Nicol y Roaf (J Fergus Nicol & Roaf, 2017), confort térmico es el término usado para describir un ambiente térmico satisfactorio y sin estrés en los edificios.

Debido a que existen grandes variaciones, tanto fisiológicas como psicológicas, de persona a persona, es difícil satisfacer a todos en un espacio, de modo que las condiciones ambientales para satisfacer esta sensación de confort no son las mismas para todos (American Society of Heating refrigerating and air conditioning engineers, 2004). Las expectativas que se tienen se suelen asociar socialmente a las definiciones que realizan en las normas, aunque realmente existe una gran variación en el confort térmico interior de acuerdo con diferentes climas, épocas de años y aspectos culturales (J Fergus Nicol & Roaf, 2017). Nicol et al (Fergus Nicol, 2017) observaron cómo la sensación de confort es sumamente variable, dependiendo del individuo. Así, estudiaron cómo en viviendas con calefacción, refrigeración y funcionamiento libre, el 90% de los sujetos japoneses se sienten cómodos en sus propios hogares con un rango de temperatura entre 18 y 28°C. Un análisis similar entre los trabajadores de oficina pakistaníes ofrece un rango de 21-30°C.

Según Santamouris (M. Santamouris, 2007) el edificio es el entorno en el que el individuo se refugia. Éste utiliza el edificio o interactúa con él para conseguir confort. El confort térmico, desde el desarrollo comercial intensivo de los sistemas mecánicos de acondicionamiento, se asocia a la utilización de máquinas, perdiendo en algunos casos el individuo la costumbre de utilizar otras estrategias de adaptación. Además, en ocasiones, la temperatura de cálculo de estos sistemas se confunde con la óptima o más adecuada para el individuo. A esto ha contribuido mucho la industria del sector, que ha difundido el enfoque de una temperatura fija para unas condiciones interiores, calculada como “óptima”, en la que no se tiene en cuenta la participación activa de los ocupantes.

Esta temperatura fija se basa en los estándares de cálculo procedentes de los resultados obtenidos por Ole Fanger en sus investigaciones comenzadas en 1970. Éste desarrolló un modelo matemático para predecir la sensación térmica de un grupo de usuarios basado en el voto medio de confort (“PMV” en inglés “Predicted Mean Vote” o voto medio estimado) y su porcentaje de insatisfacción con el ambiente térmico (PPD “Predicted Percentage of Dissatisfied” o porcentaje de insatisfechos). Para ello, se basó en experimentos realizados con estudiantes en edad universitaria, en una cámara climática controlada, para su uso en condiciones ambientales fijas y en edificios con unas condiciones de climatización total. Este modelo fue posteriormente adoptado por diferentes normativas para evaluar el confort térmico de los edificios (ISO 7730, ISO 7130; CEN 15251).

Así mismo, según el autor, para Fanger el confort térmico es un “producto” de la industria “vendido” al consumidor. Así, se asume que se necesita un ambiente interior cerrado y estable y que cualquier desviación produce falta de confort. Sin embargo, las personas no se encuentran en una cámara de ensayo y puede que no estén realizando todas la misma actividad, ni tengan la misma vestimenta ni el mismo proceso metabólico. Es por ello que algunos investigadores como Humphreys y Nicols, plantean dudas sobre la validez de la fórmula de Fanger. Según ellos, las personas tienen una tendencia natural a adaptarse a las condiciones cambiantes del medio (J F Nicol & Humphreys, 2002). Esto es una característica del comportamiento humano, siendo “antinatural” para el ser humano estar todo el día a la misma temperatura. La temperatura de confort depende de muchos factores, tanto ambientales como sociales, así como varía según el historial térmico de la persona, del género, la raza, la nacionalidad, etc...En general, la persona reacciona cuando no siente confort térmico, adaptando la ropa, la postura, la actividad, utilizando protecciones solares o incluso cambiando el ambiente en el que se encuentran (M. Santamouris, 2007). Así, con un enfoque opuesto al de Fanger, sus estudios van orientados a definir y parametrizar el confort adaptativo.



Para ello, realizan estudios de campo basados en encuestas realizadas a usuarios de edificios reales y en diferentes localizaciones. Observan discrepancias entre los índices fijos y las encuestas de campo (Fergus Nicol & Humphreys, 2016), pudiendo ser esto debido, según los autores, al hecho de que los usuarios se habían adaptado ya al ambiente, por lo que se sentían confortables a determinada temperatura que no coincidiera con el valor fijo teórico para ambientes cerrados y totalmente climatizados.

Otros, como Yu et al. analizan esta cuestión aplicada a casos concretos, estudiando comparativamente la adaptabilidad térmica de las personas acostumbradas a ambientes con aire acondicionado y con ventilación natural (J. Yu, Q. Ouyang, Y. Zhu, H. Shen, G. Cao et al., 2012). Los resultados muestran que el grupo asociado a espacios ventilados naturalmente tenían una capacidad de regulación fisiológica significativamente superior ante un golpe de calor que los acostumbrados a ambientes con aire acondicionado. En otras palabras, el primer grupo no encontraba las condiciones tan calurosas y poco confortables como el segundo grupo. Estos resultados demuestran que vivir y trabajar en espacios interiores acondicionados por largos periodos de tiempo afectan a la capacidad fisiológica de aclimatación. También parece que estas condiciones estables mantenidas con aire acondicionado durante un tiempo prolongado puede debilitar la capacidad de adaptación térmica de las personas. Cheng Y et al investigan el potencial de la ventilación natural a nivel mundial, teniendo en cuenta las distintas variaciones regionales y climáticas (Y. Chen, Tong, & Malkawi, 2017) y tratan también con bastante detalle las cuestiones del confort adaptativo. En el clima de Australia (Soebarto & Bennetts, 2014), Soebarto y Bennetts estudian las estrategias de refrigeración que usan las familias de ingresos medios en sus casas en verano. La solución que era menos valorada era la de utilizar refrigeración mecánica, debido a la repercusión en la factura eléctrica. Por ello, las familias en sus casas utilizaban preferentemente ventiladores de techo, abrían y cerraban ventanas y puertas, así como cortinas como primeras medidas para sentirse más frescos. También adecuaban tanto la vestimenta como el tipo de actividades que desarrollaban en cada momento del día.

Según Santamouris, (M. Santamouris, 2007) en un edificio en oscilación libre (free-running), la temperatura interior estará relacionada con la exterior y la temperatura de confort variará a lo largo del año. Así mismo, el confort es un objetivo que cumplir, no un producto que definir. Por otro lado, los edificios deben permitir adaptaciones del usuario en un contexto variado y variable, así como considera que el control individual es más efectivo que el grupal. En la misma línea, Humphreys y Nicol (J F Nicol & Humphreys, 2002) plantean que los edificios refrigerados pasivamente no pueden controlarse de la misma manera que los que tienen sistemas mecánicos, proponiendo un modelo adaptativo del confort térmico. Además, analizaron algunas de las últimas investigaciones relacionadas con el confort adaptativo, proponiendo su utilización para la futura definición de estándares sostenibles para el clima interior de los edificios.

$$T_c = 13.5 + 0.54 T_o$$

**Fig.1.11.** Fórmula propuesta por Humphreys y Nicol (J F Nicol & Humphreys, 2002)

Numerosos estudios están cuestionando los estándares actualmente aceptados como recomendables o de diseño (J Fergus Nicol & Roaf, 2017), así como su viabilidad desde el enfoque de la sostenibilidad de los edificios (Chappells & Shove, 2005). También cuestionan si su determinación se debe aspectos de salubridad y confort real o están más identificados con aspectos socio-económicos. El European Standard EN15251 permite considerar el confort térmico en edificios en free-running (F Nicol & Pagliano, 2007). El standard ASHRAE 55-2010 (ASHRAE Standing Standard Project Committee 55, 2011) es cuestionado por Nicols y Wilson, los cuales proponen determinadas mejoras en el mismo.

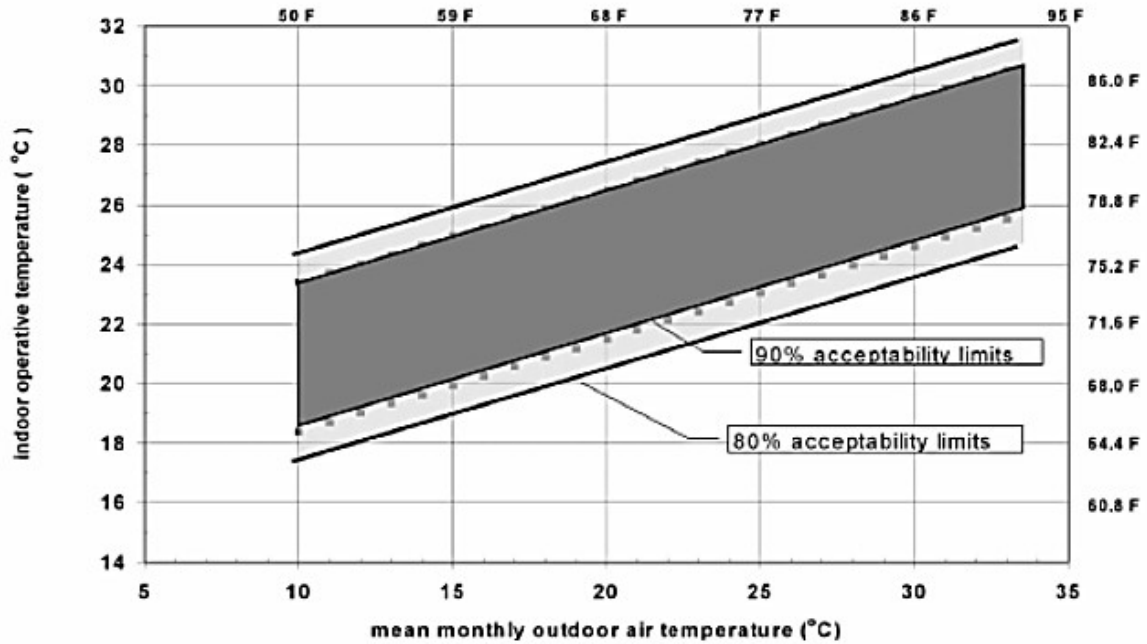


Fig.1.12. Thermal confort standard. ASHRAE 55 (American Society of Heating refrigerating an air conditioning engineers, 2004)

Otros autores toman como referencia para el desarrollo de sus investigaciones el algoritmo adaptativo de Humphreys. Toe et al. (Toe, Kubota, Hooi, Toe, & Kubota, 2013) proponen una ecuación de confort adaptativo para edificios ventilados naturalmente en climas húmedos y cálidos, estudiando datos estadísticos de la base de datos de ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) RP-884.

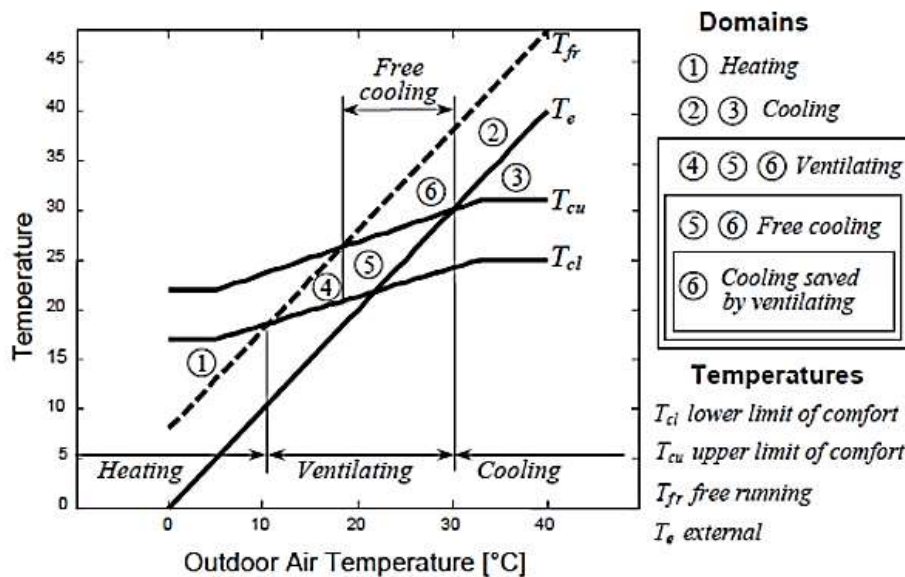


Fig.1.13. Dominios de la ventilación, calefacción y refrigeración. Reproducido de (Germano, Ghiaus, & Roulet, 2004)

Germano et al, proponen (Germano et al., 2004) el análisis combinado de varios factores. En base a la temperatura interior del edificio en oscilación libre, la temperatura de confort y la zona de confort, se expresan los dominios donde pueden operar los sistemas de calefacción, refrigeración o ventilación. La calefacción será necesaria cuando la temperatura en oscilación libre esté por debajo de límite de la zona de confort. La refrigeración será necesaria cuando tanto la temperatura exterior como la temperatura interior estén por encima de los niveles de la zona de confort. La ventilación debe emplearse en los momentos intermedios entre ambas situaciones.

Investigadores de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) han analizado también las posibilidades de confort adaptativo en el clima de Sevilla (Barbadilla-Martín et al., 2017), proponiendo un modelo adaptativo para edificios híbridos, donde la temperatura de consigna sea variable en función de la época del año. Con esta propuesta obtienen un interesante ahorro de energía en la operación de edificios de oficinas.

Por último cabe señalar que las últimas publicaciones de Fanger, de 2002, (Ole Fanger, 2001; Ole Fanger & Toftum, 2002; P Ole Fanger, 2001) analizan cómo optimizar su estándar inicial y van en la línea de flexibilizar la consideración de la temperatura de confort fija, teniendo en cuenta de algún modo el confort adaptativo. De hecho, Fanger y Toftum analizan un modelo PMV para edificios no acondicionados en clima cálido (Ole Fanger & Toftum, 2002). En este observan cómo en edificios sin aire acondicionado en climas cálidos, los ocupantes pueden sentir menos calor de lo que el PMV predice.



## 2.- La Calidad del Ambiente Interior

### Resumen

En este apartado se aborda en primer lugar el concepto Calidad del Ambiente Interior, del cual forma parte fundamental la Calidad del Aire. En un segundo apartado se describe el concepto de ventilación como estrategia para controlar la CAI (calidad del aire interior), definiéndose también los distintos sistemas que pueden incorporarse en los edificios con este fin. A continuación se analiza la cuestión de los contaminantes, por ser los que constituyen la base de partida fundamental en las estrategias de ventilación. Se trata también el concepto de ratio o tasa de ventilación recomendable o necesaria. Por último, se identifican los principales grupos de investigación relacionados con la ventilación y se analizan proyectos publicados que se centran en la cuestión de la ventilación en los edificios.

### 2.- La Calidad del Ambiente Interior

2.1	La Calidad del Ambiente Interior .....	58
2.1.1	La Calidad del Aire Interior y la ventilación .....	58
2.1.2	Ventilación y energía .....	59
2.1.3	El sobrecalentamiento de los espacios .....	61
2.2.	Sistemas de ventilación. Tipos .....	62
2.2.1	La ventilación mecánica .....	63
2.2.2	La ventilación natural .....	63
2.2.3	La ventilación híbrida .....	64
2.2.4	Consideraciones sobre la elección del sistema .....	64
2.2.5	Problemas asociados a los SVM.....	66
2.3	Contaminantes y tasa de ventilación .....	67
2.3.1	Los contaminantes .....	67
2.3.2	La tasa de ventilación .....	69
2.4	Investigación relacionada con la ventilación .....	70
2.4.1	Grupos de investigación .....	70
2.4.2	Proyectos de investigación .....	71

## 2.1 La Calidad del Ambiente Interior

La Calidad del Ambiente Interior está determinada por diferentes parámetros que es necesario controlar para garantizar el confort del usuario en los espacios interiores. Estos son las condiciones térmicas, las condiciones acústicas y visuales y la Calidad del Aire Interior (CAI).

De entre los factores mencionados, la Calidad del Aire en los espacios interiores tiene especial relevancia dada su relación con la salubridad de los espacios, que afecta a la salud del usuario que desarrolla en ellos sus actividades.

En la actualidad, la mayoría de los estándares que evalúan la CAI se basan directa o indirectamente en los hallazgos de las primeras investigaciones de Pettenkofer y Yaglou, en los que los biofluentes humanos (con el  $\text{CO}_2$  como indicador) son la base (ECA Urban air indoor environment and human exposure, 2003). Así, la CAI se mide habitualmente, en los espacios ocupados por personas, a través de la concentración de  $\text{CO}_2$ . Aunque el  $\text{CO}_2$  no sea un contaminante en sí mismo, se suele considerar que su nivel es un buen indicador de la CAI (Ramalho et al., 2015). En la Fig. 2.1 se muestra la caracterización que realiza el CTE de la cantidad acumulada de  $\text{CO}_2$  en partes por millón (ppm) para los espacios ocupados por las personas en relación al tiempo donde establece un valor base y una cantidad de ppm hora que puede superarse el mismo.

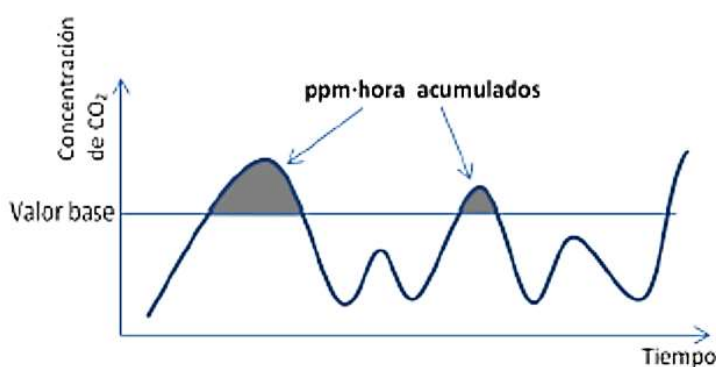


Fig.1.14. Acumulado anual de  $\text{CO}_2$  según el DBHS del CTE (Ministerio de Fomento, 2017)

### 2.1.1 La Calidad del Aire Interior y la ventilación

Los conceptos más relevantes a tener en cuenta para el control de la CAI son, según Awbi (H. B. Awbi, 2008), la transferencia de calor, la masa térmica y la ventilación y la circulación del aire.

Aunque la ventilación deba realizarse por diversas razones, la más importante de ellas es eliminar o diluir los contaminantes generados en interiores y suministrar aire fresco para los seres humanos (ECA Urban air indoor environment and human exposure, 2003). De este modo, la Calidad del Aire Interior se controla habitualmente a través de la ventilación, renovando el aire del interior con aire exterior para eliminar los contaminantes que se producen en el interior de los espacios. Así, la ventilación de los edificios se convierte en un elemento fundamental para la calidad de vida en los espacios interiores (Hazim B Awbi, 1998), siendo un requerimiento para respirar y eliminar la contaminación del interior. Steve et al. (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005) definen como el principal papel de la ventilación proveer un nivel adecuado de CAI removiendo y diluyendo los contaminantes del aire.

Según Santamouris (M. (Matheos) Santamouris & Wouters, 2006), asegurar el óptimo funcionamiento de la ventilación es una parte primordial del diseño de los edificios. En su libro "Building Ventilation: the state of the art", se recogen diferentes pautas a tener en consideración para el diseño de la ventilación en los edificios. Este está elaborado junto con expertos de Europa y EEUU y publicado en asociación con la AIE ("IEA (International Energy Agency)," n.d.) y Air Infiltration Ventilation Centre (AIVC) (AIVC, 2018). En el mismo, se presenta una clasificación y evaluación de los avances más relevantes en ventilación en todo tipo de edificios, siendo la ventilación natural una parte representativa del mismo.

Desde el punto de vista del diseño de los edificios, es interesante la definición que realiza Awbi (Hazim B Awbi, 1998), ya que según él la ventilación es el proceso de proporcionar aire fresco a los ocupantes de los edificios en

lugar de a los edificios en sí mismos, para mantener un nivel adecuado de calidad del aire con un mínimo coste e impacto ambiental. Este matiz, a veces queda en el olvido a la hora de incorporar un sistema de ventilación en un edificio, y sin embargo, debe ser el punto de partida de la reflexión que se haga en este sentido en las primeras fases del diseño.

Con la finalidad de proporcionar una adecuada CAI, pueden adoptarse 3 tipos de estrategias de ventilación (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005):

- 1) Ventilación por extracción (extract ventilation): para eliminar contaminantes en la fuente de origen puntualmente reemplazando el aire extraído con aire exterior
- 2) Ventilación en todo el edificio (whole-building ventilation-supply and extract): para dispersar y diluir otros contaminantes
- 3) Ventilación de purga (purge ventilation): para eliminar altas concentraciones puntuales de actividades ocasionales (por ejemplo pintura)

Siendo la segunda la que se suele evaluar en el diseño de los edificios y sus sistemas.

En ocasiones se relaciona la Calidad del Aire Interior con la Calidad del aire Exterior (CAE). Los parámetros de la CAE que se suelen evaluar se encuentran regulados a nivel internacional y suelen ser los de origen físico y químico y la materia particulada.

En cualquier caso, la estrategia prioritaria para garantizar la CAI debe ser el control de las fuentes emisoras de contaminantes, tal como recomienda la Organización Mundial de la Salud (OMS) (WHO Regional Office for Europe, 2015). Junto a ésta, recomienda también el análisis de otros aspectos de diseño relativos al edificio tales como: i) la localización; ii) el diseño y la elección de los materiales; iii) y la gestión, uso y mantenimiento.

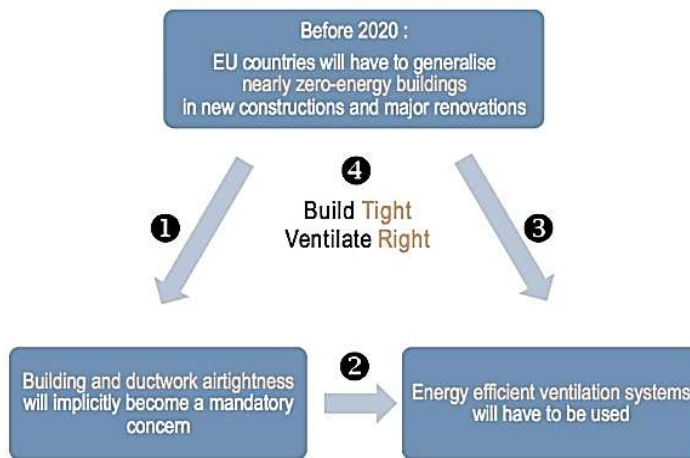
### 2.1.2 Ventilación y energía

Para garantizar unas adecuadas condiciones del ambiente interior, incluyendo una buena CAI, en la mayoría de los casos se requiere el uso de energía (ECA Urban air indoor environment and human exposure, 2003). Los edificios consumen energía para satisfacer las necesidades de confort interior cuando este depende de instalaciones y sistemas mecánicos. El consumo de energía en los edificios supone el 40% del total consumido en la Unión europea (European Parliament, 2002). Esta es una tendencia creciente, estimándose que los individuos pasan cerca del 90% en espacios cerrados (ECA Urban air indoor environment and human exposure, 2003) (Velux, n.d.)

Según Chenari et al. (Chenari et al., 2016), los sistemas HVAC son los principales responsables del uso de energía en los edificios, suponiendo entre el 60 y el 70% del total del consumo de energía en los de uso no industrial (comercial y doméstico). Esta situación se deriva, en parte, de la forma de diseñar los edificios en el SXX, en los que las cuestiones relacionadas con la ventilación natural han sido olvidadas o relegadas a un segundo plano en aras de obtener un diseño “moderno” en el que han primado las grandes plantas diáfanas con grandes fachadas acristaladas e importantes ganancias solares asociadas (Linden, 1999), lo cual ha llevado a hacer necesarios sistemas de acondicionamiento de considerables dimensiones. Desde el enfoque de la sostenibilidad, parece que lo razonable sería limitar el tamaño de estos sistemas mecánicos al mínimo, para reducir al máximo su consumo de energía en los edificios. Aparte de los sistemas de ventilación propiamente dichos, en los edificios suele haber cierta entrada de aire a través de la envolvente, comúnmente conocida como infiltración. Entre el 30-50% de la energía consumida por los sistemas HVAC se debe a la ventilación y las infiltraciones (Khan et al., 2008). En cuanto a su consideración en relación a la calidad del aire, hay una distinción clara entre infiltración y ventilación, dado que las infiltraciones son incontroladas y no se puede garantizar el caudal de aire que proporcionan y la ventilación es controlada y dimensionada por el proyectista. En algunos estándares de diseño, las infiltraciones pueden considerarse como parte de la ventilación necesaria, mientras que en otras son explícitamente excluidas del cálculo.

Con la crisis energética, se buscaron soluciones para reducir el gasto energético de los edificios, por lo que se desarrollaron sistemas que incrementaron su hermeticidad (Gil-Baez et al., 2017a). Sin embargo, la reducción de la ventilación que se producía por las infiltraciones naturales de la edificación, dio lugar a un empeoramiento de la calidad del aire interior (contaminantes, mohos, hongos.. etc..), especialmente en países en los que el clima y la

costumbre no permitían realizar tareas diarias de ventilación de los espacios de manera activa por parte del usuario. De este modo, la ventilación pasó a ser un elemento fundamental en el diseño de los edificios.



**Fig.1.15.** Aumento de los sistemas de ventilación por incremento de los requerimientos de hermeticidad. (fuente Tightvent ("TightVent Europe. Building and ductwork airtightness platform," n.d.))

En este sentido, la asociación AIVC (AIVC, 2018) lleva décadas estudiando la ventilación en los edificios, colaborando con diversas universidades y realizando la divulgación de los resultados de investigación a través de numerosas publicaciones. Así mismo, convoca anualmente un congreso internacional que sirve de plataforma de intercambio de experiencias entre los especialistas en la materia ("AIVC Conference 2018," n.d.).

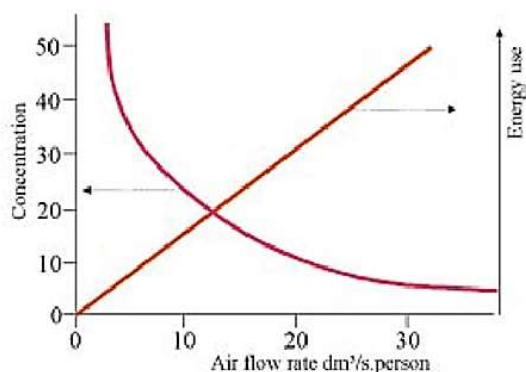
Más adelante, con la definición del concepto de edificios de consumo casi nulo, a la necesidad de reducción del consumo de energía se sumó el objetivo de reducción de las emisiones, con lo que para alcanzarlos se hicieron necesarias nuevas medidas para reducir aún más la demanda de energía necesaria en el acondicionamiento de los espacios interiores (European Parliament, 2010). Con este propósito, se identifican dos tipos de estrategia de ahorro de energía que han sido ampliamente utilizadas en relación a los sistemas de HVAC en los edificios: i) el incremento de la hermeticidad para reducir las pérdidas de energía y ii) la inclusión de recuperadores de calor en los sistemas HVAC.



**Fig.1.16** Balance gasto energético calefacción vs ventilación (fuente propia)

Estas estrategias pueden tener su interés en climas fríos, con temperaturas exteriores muy bajas, pero no está del todo clara la ventaja de su utilización en climas suaves como el mediterráneo. Además, este tipo de sistemas, en ocasiones no proporcionan los resultados previstos ni siquiera en clima frío. Esto puede suceder bien porque no ofrezcan una adecuada calidad del aire aunque optimicen el consumo de energía (Wargocki & Wyon, 2013), o bien porque utilicen un volumen de aire elevado (Allard et al., 1998; ECA Urban air indoor environment and human exposure, 2003; M. (Matheos) Santamouris & Wouters, 2006), que puede perjudicar las condiciones térmicas interiores y conlleve un consumo de energía superior al necesario. Por esto es fundamental encontrar el equilibrio adecuado entre ambos aspectos. En la siguiente figura, se muestra, tal como representan diversas publicaciones, la

relación entre la tasa de ventilación por persona recomendable, el uso de energía y la concentración de contaminantes



**Fig.1.17.** Relación típica entre tasa de ventilación y la energía usada para ventilación. (Allard et al., 1998; ECA Urban air indoor environment and human exposure, 2003)

Por otro lado, aunque los recuperadores de calor en los sistemas de ventilación mecánica se han utilizado ampliamente en las dos últimas décadas (Y. Wang, Zhao, Kuckelkorn, Li, & Wang, 2014), los edificios ubicados en zonas de clima suave, como el sur de España, pueden alcanzar los límites de consumo energético sin necesidad de recuperación de calor en la ventilación según Guillén-Lambea et al (Guillén-Lambea, Rodríguez-Soria, & Marín, 2016). Esto lo han mostrado Almeida et al. en Portugal (Almeida & De Freitas, 2014). En estos casos, la ventilación natural se postula como una alternativa a los sistemas mecánicos de ventilación o los estándares promulgados como “pasivos”, que se basan en ventilación mecánica. Sassi propone en su investigación (Sassi, 2013) un modelo de consumo de energía ultra-bajo basado en el potencial que ofrece la ventilación natural en comparación con el estándar Passivhaus.

Otros autores, como Chenari et al, (Chenari et al., 2016) afirman que la ventilación está interrelacionada con diversos factores, tales como las condiciones del ambiente interior y del exterior, las características del edificio y el uso del mismo o el comportamiento de los usuarios. Todos ellos deben ser tenidos en cuenta para el diseño de sistemas de ventilación eficientes energéticamente y saludables.

### 2.1.3 El sobrecalentamiento de los espacios

El exceso de hermeticidad y los elevados niveles de aislamiento térmico de los edificios, realizados con la intención de reducir el gasto en energía, están produciendo problemas de sobrecalentamiento en el interior de los espacios, provocando la necesidad de refrigeración en lugares en los que no debería ser necesaria (CIBSE, 2013), o incluso en épocas del año como en invierno (Yu, Heiselberg, Lei, Pomianowski, & Zhang, 2015). A este efecto contribuyen también, según Barbason y Reiter (Barbason & Reiter, 2014), la falta de protección solar y de estrategias de refrigeración pasiva. Según Carrilho y Linden (Carrilho & Linden, 2016), la mejora continua del aislamiento térmico de las envolventes de los edificios, combinado con el incremento de las ganancias internas, hacen que haya menos necesidad de calefacción en invierno, pero crean la necesidad de refrigeración el resto del año. Oropeza-Perez y Østergaard (Oropeza-Perez & Østergaard, 2014) documentan casos de edificios en Dinamarca con problemas de sobrecalentamiento y Badescu et al. (Badescu, Laaser, & Crutescu, 2010) de un edificio de oficinas en Rumania construido con el estándar Passivhaus. Este último muestra incluso la necesidad de refrigeración así como una demanda de energía mayor que un edificio que no lo estuviera construido con este estándar. CIBSE (Chartered Institution of Building Services) (“CIBSE - Chartered Institution of Building Services Engineers,” n.d.) por su parte tiene publicado el manual TM 52, con recomendaciones específicamente orientadas a evitar el sobrecalentamiento en el interior de los edificios en Europa (CIBSE, 2013).

Puede decirse que esta situación también es debida a la generalización de la arquitectura de “estilo internacional”. Los elementos de diseño que han influido en este sentido son, según Santamouris (M. Santamouris, 2007), fachadas herméticas y totalmente acristaladas, que funcionan como colector solar, y a la vez proporcionan una muy baja inercia térmica al edificio, junto con el diseño de planta alargada con mucho fondo y poca posibilidad de ventilación cruzada. Así mismo, la generalización de la falta de elementos de protección solar y la no utilización de

soluciones de ventilación natural, han hecho que se dé en este tipo de edificios problemas de elevado consumo al que se lleva décadas buscando solución. Claro ejemplo de este tipo de diseño son los edificios actuales de oficinas, en los cuales, según Carrilho y Linden (Carrilho & Linden, 2016), el propio diseño ha hecho del edificio un colector solar y un consumidor de energía importante.

Por otro lado, los estudios demuestran la tendencia en el incremento de la demanda de los sistemas de refrigeración. Li et al (D. H. W. Li et al., 2014) analizan la previsión del estrés térmico a nivel mundial. En su estudio concluyen que la tendencia será que se incremente la necesidad de refrigeración tanto en climas cálidos como fríos. Como resultado de esto y del hecho de que la refrigeración habitualmente funciona con electricidad, se prevé un incremento importante del consumo eléctrico a nivel mundial. Si este no viene acompañado de un incremento de su obtención desde renovables, el impacto en las emisiones será inasumible. Por tanto, la tendencia en el diseño de los edificios debería ir encaminada a evitar el sobrecalentamiento y a hacerlos menos dependientes de los sistemas mecánicos de refrigeración, tal como, por otro lado, manifiestan las directivas europeas de eficiencia energética en los edificios (Comisión Europea, 2010, 2018; DOCE Diario Oficial de la Unión Europea, 2012). En este sentido, existen numerosos estudios enfocados en la reducción de esta dependencia de los sistemas mecánicos de refrigeración. Unos se centran en el análisis de soluciones de refrigeración pasiva y otros proponen sistemas más complejos que combinan con otros principios físicos, como el que estudian Yu et al (Yu et al., 2015) combinando estrategias de ventilación natural y activación de la masa térmica del edificio.

## 2.2. Sistemas de ventilación. Tipos

La ventilación es el proceso de suministro o remoción de aire desde un espacio con el propósito de controlar los niveles de contaminación en el aire, humedad o temperatura dentro del recinto (ASHRAE, 2009). También se define como el proceso de renovación del aire de los locales para limitar el deterioro de su calidad, desde el punto de vista de su composición, que se realiza mediante entrada de aire exterior y evacuación de aire viciado (Ministerio de Fomento, 2017).

Existen distintos tipos de sistemas de ventilación. La selección de uno u otro dependerá del tipo de edificio, de su funcionamiento y del usuario, así como del clima de la zona de implantación, el tipo de materiales empleados en la construcción y del propio diseño del edificio. Santamouris y Wouters (M. (Matheos) Santamouris & Wouters, 2006) presentan una clasificación de los avances más recientes en las áreas clave de ventilación y su aplicación a diferentes tipos de edificios. Awbi detalla también los fundamentos de diseño y funcionamiento (H. B. (Hazim B. . Awbi, 2008).

La clasificación más generalizada establece dos grandes grupos en base a su principio de funcionamiento y diseño: i) sistemas de ventilación mecánica y ii) sistemas de ventilación natural.

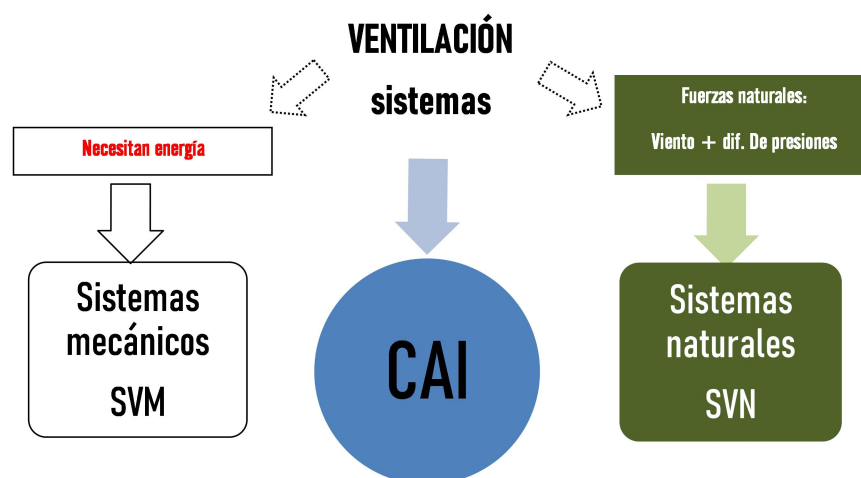


Fig.1.18. Sistemas de ventilación. Clasificación básica (fuente propia)



### 2.2.1 La ventilación mecánica

La ventilación mecánica (VM) puede definirse como aquella que introduce aire exterior en el interior de los espacios de manera forzada, ejerciendo la impulsión con un motor a través de conductos. Según el estándar ASHRAE 62 (ASHRAE, 2009) la ventilación mecánica es la ventilación producida por equipos impulsados mecánicamente, tales como ventiladores, movidos por motores eléctricos, pero no por ventiladores movidos por turbinas eólicas o ventanas operadas mecánicamente. Estos sistemas suelen disponer de una red de conductos de impulsión y otra de red de retorno. Todos ellos confluyen en la Unidad de Tratamiento de Aire (UTA) en la que se ubican distintas secciones, entre las que se encuentran los motores de impulsión y de retorno y los filtros en su caso. Otro componente que puede haber es una batería de calor, si se precalienta el aire antes de su impulsión.



**Fig.1.19.** Imagen de una UTA. en la cubierta de un edificio escolar de educación secundaria en Sevilla. (fuente propia)

Estos sistemas utilizan electricidad para su funcionamiento. El elevado consumo eléctrico en épocas en las que el aire se trata térmicamente y en las que por condiciones de Calidad del Aire, éste debe ser renovado al 100% sin recirculación del mismo, llevó al desarrollo de dispositivos denominados “recuperadores de calor” (Mardiana-idayu & Riffat, 2012), que se incorporan a la UTA con la finalidad de aprovechar el calor del aire de expulsión y reducir el consumo de energía necesario para calefactar el nuevo aire de impulsión. Así mismo, la UTA puede incluir algún dispositivo de by-pass que permita la ventilación en modo free-cooling, sin batería de calor ni recuperación. Si no se dispone este elemento se puede dar el caso de producir un sobrecalentamiento indeseado en época intermedia en la que no es necesaria la calefacción ni la refrigeración pero sí es necesario renovar el aire.

Las UTAs se diseñan específicamente para cada edificio. Su dimensionamiento se realiza en base a parámetros de confort interior “estandarizados” en distintas normativas, que se suelen basar en los estudios de Fanger (M. Santamouris, 2007), llevados a cabo en cabinas de ensayo en laboratorios, en los que se analizaban las condiciones del ambiente interior en un espacio completamente cerrado y acondicionado mecánicamente y el “confort” proporcionado al usuario, sin tener en cuenta condiciones culturales, sociales o climáticas.

### 2.2.2 La ventilación natural

La ventilación natural (VN) puede definirse como aquella que introduce aire exterior en el interior del edificio a través de aberturas en la envolvente y utilizando las fuerzas naturales debidas a la presión del viento y la diferencia de temperaturas en los edificios. Según el estándar ASHRAE 62.1 “Ventilación para una calidad aceptable del aire interior (ASHRAE, 2009), la VN es la ventilación producida por razón de diferencias de temperatura, el viento o la difusión a través de puertas, ventanas u otras aberturas intencionadas del edificio (ASHRAE, 2009). Es la ventilación en la que la renovación del aire se produce exclusivamente por la acción del viento o por la existencia de un gradiente de temperaturas entre el punto de entrada y el de salida (Ministerio de Fomento, 2017).

Estos sistemas funcionan sin consumo eléctrico y dependen del diseño del propio edificio, su ubicación y el dimensionamiento y posición de las admisiones de aire. Estas admisiones pueden ser aberturas o ventanas. Así mismo, las entradas de aire pueden diseñarse con elementos de control para su operación basados en sondas de medición de temperatura, humedad o CO<sub>2</sub> y en actuadores automáticos. Los fundamentos físicos de funcionamiento y diseño se desarrollan en el próximo apartado.

Además de mantener niveles aceptables de oxígeno en el aire y eliminar los olores, la humedad y los contaminantes internos, la ventilación también puede eliminar el exceso de calor mediante enfriamiento directo o mediante el uso de la masa térmica del edificio (Germano et al., 2004).

### 2.2.3 La ventilación híbrida

La ventilación híbrida (VH) se encuentra en un punto intermedio entre las dos anteriores. Es aquella que permite que el edificio funcione en determinados momentos con ventilación mecánica y otros con ventilación natural, dependiendo de determinados factores que se consideran en el diseño, como pueden ser la estación del año y la temperatura exterior. Según el CTE (Ministerio de Fomento, 2017) la ventilación híbrida es la ventilación en la que, cuando las condiciones de presión y temperatura ambientales son favorables, la renovación del aire se produce como en la ventilación natural y, cuando son desfavorables, como en la ventilación con extracción mecánica.

### 2.2.4 Consideraciones sobre la elección del sistema

En numerosas ocasiones, el sistema de ventilación se liga al tipo de sistema de acondicionamiento térmico (refrigeración y calefacción), unificando todas las funciones en un mismo elemento, lo cual permite simplificar el diseño y la construcción. Sin embargo, esta elección no optimiza las prestaciones al usuario, ya que estos sistemas pueden ser adecuados para ofrecer un aspecto de confort ambiental, pero no ser el mejor sistema para proporcionar otro de los aspectos necesarios (por ejemplo, en el caso de la climatización por aire, puede ser un sistema adecuado para refrigeración, pero no es el sistema que mejor confort ofrece para calefacción).

Esta situación viene propiciada en ocasiones por la normativa y los reglamentos técnicos, en los que se tiende a simplificar las soluciones, presuponiendo estándares de edificios herméticos y con temperatura constante a lo largo del año (M. Santamouris, 2007). En la normativa española para edificios de uso terciario se tiende, también de modo simplista, a asociar el diseño de estos edificios al uso de UTAs, en parte favorecido por el modo en que esta está redactada (Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios RITE (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013)).

Según Santamouris (M. Santamouris, 2007), los edificios “centralizados” que usan combustibles convencionales pronto dejarán de poder garantizar el confort a sus ocupantes a precios razonables. Otras publicaciones recomiendan además el desacople de los sistemas, de modo que cada uno responda a su propio objetivo (ventilación, calefacción o refrigeración). Al ser la capacidad de transmisión de calor del agua muy superior a la del aire (el agua es 7000 veces mejor para refrigeración y 15000 veces mejor para calefacción que el aire), el aire debe emplearse sólo para renovar el aire viciado interior, pero no para calefactar (H. B. Awbi, 2008). Si en cualquier caso, se utilizase el aire para calefactar, entonces deberán incorporarse recuperadores de calor para no hacer el proceso demasiado ineficiente. En cualquier caso, mezclar ambos es una cuestión que no debería suceder, siendo lo más recomendable que el sistema de acondicionamiento térmico sea independiente del de ventilación (H. B. Awbi, 2008).

La elección del tipo de sistema de ventilación no debería ser una cuestión a incorporar en el edificio “a posteriori”, sino que debería ser un elemento a decidir desde los primeros planteamientos de diseño. Según CIBSE (Steve Irving, Brian Ford & CIBSE, 2005), esta cuestión es compleja y estará determinada por múltiples factores, tal como se muestra en la Fig.1.20.



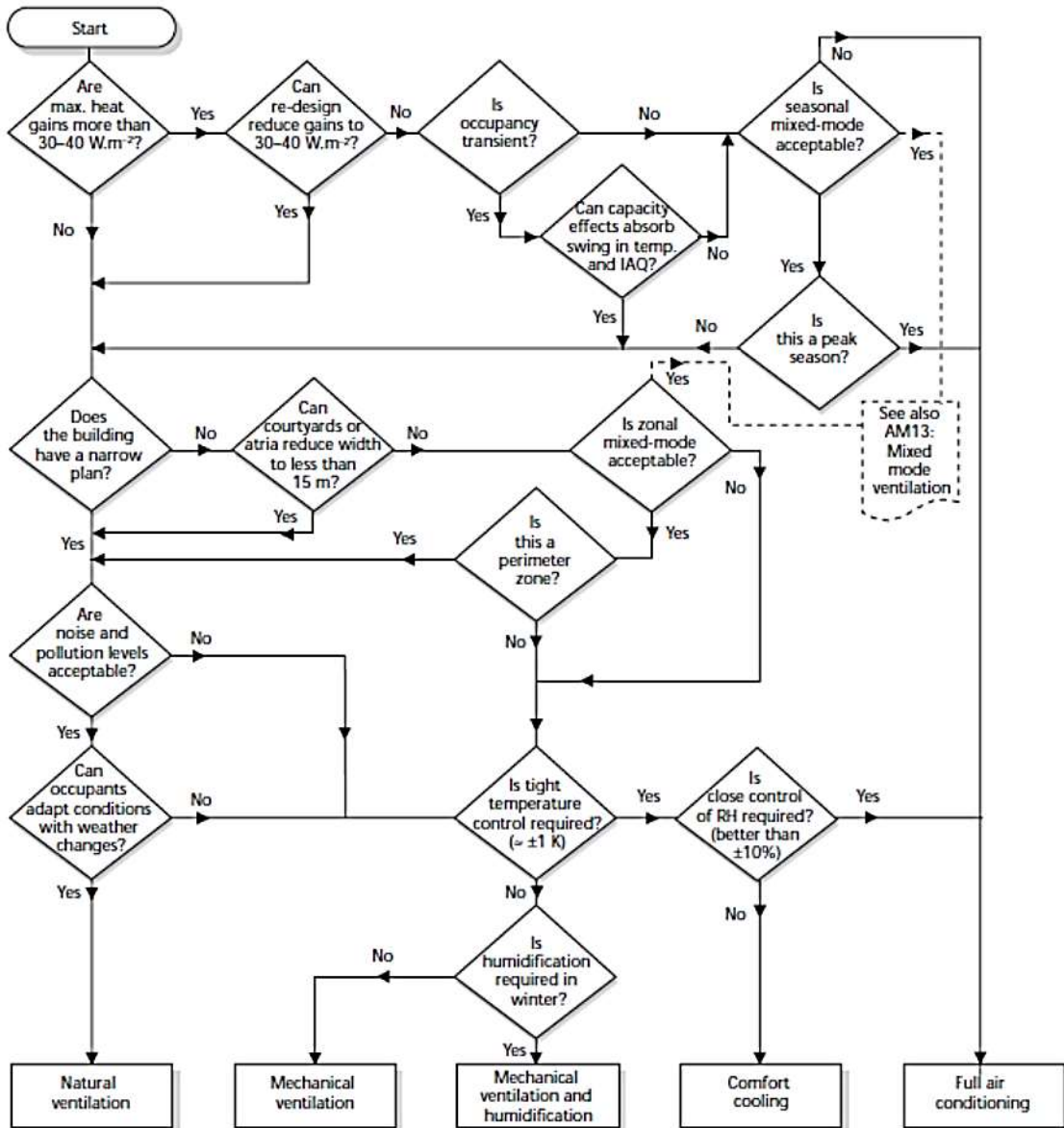


Fig.1.20. Análisis para seleccionar el sistema de ventilación en el edificio. Reproducido de (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005)

El tema de los sistemas de ventilación sigue siendo objeto de investigación y se elaboran nuevas propuestas. Por ejemplo, la de Ole Fanger de 2001, que propone sistemas totalmente individualizados en oficinas, tal como se reproduce en la Fig.1.21. Yang et al. proponen un sistema de ventilación individualizado similar (J. Yang, Zhou, Jin, Wang, & Xiong, 2016).

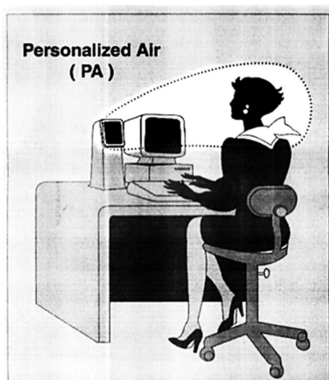
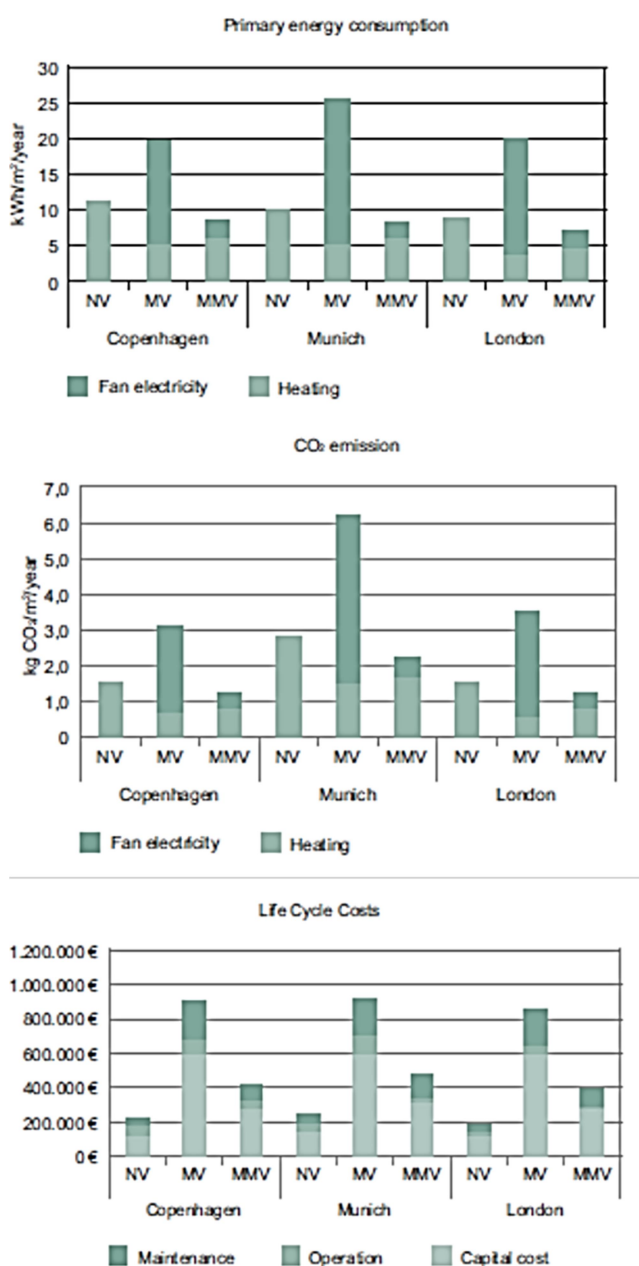


Fig.1.21. Sistema de ventilación individualizado. (fuente: reproducido de (Ole Fanger, 2001))

### 2.2.5 Problemas asociados a los Sistemas de Ventilación Mecánica (SVM)

En las pasadas décadas se han identificado determinadas dolencias relacionadas con el ambiente interior de los espacios no industriales (Redlich, Sparer, & Cullen, 1997), ya que las personas se encuentran expuestas en ellos a ciertos contaminantes aunque sea a niveles bajos. El término Síndrome del Edificio Enfermo (SBS-sick building syndrome) se refiere a determinadas molestias inespecíficas que incluyen irritaciones del aparato respiratorio, dolor de cabeza, fatiga, y erupciones cutáneas. Según Redlich et al. (Redlich et al., 1997) este síndrome se ha dado con mayor frecuencia desde 1970 cuando los edificios de oficinas más antiguos y ventilados naturalmente comenzaron a ser sustituidos por los nuevos diseños “más eficientes” y más herméticos. Según Awbi (H. B. Awbi, 2008), en los sistemas mecánicos, los propios filtros son una de las principales fuentes de contaminación del espacio interior en el cual introducen aire, si no se lleva a cabo un riguroso y exhaustivo mantenimiento.

Adicionalmente, se han identificado mayores consumos de energía primaria asociados a la utilización de SVM en estudios comparativos con otros tipos de sistemas, así como un mayor impacto en el análisis del ciclo de vida del edificio (LCA). En la Fig.1.22 se muestran los resultados de los estudios realizados por el Fraunhofer IBP (Physics, n.d.) para la empresa Windowmaster (“Windowmaster,” n.d.), publicados en su whitepaper “Savings with natural and hybrid ventilation”.



**Fig.1.22.** Análisis comparativo de un edificio funcionando con un Sistema VN, Sistema VM y Sistema VH en tres localizaciones. Arriba) consumo de energía primaria en kWh/m² año; centro) emisiones de CO₂ en kg/m² año; abajo) análisis del ciclo de vida en euros (fuente: reproducido de <https://www.windowmaster.com> (“Windowmaster,” n.d.))

En la Fig.1.22 se observa el mejor comportamiento de los sistemas de ventilación natural e híbrida en comparación a los mecánicos tanto en términos de consumo de energía primaria como de emisiones de CO<sub>2</sub>. En los casos estudiados la ventilación híbrida ofrece resultados ligeramente mejores que la ventilación natural. Este dato debe analizarse teniendo en cuenta que los tres escenarios analizados presentan un clima más frío en invierno que en la zona mediterránea. En cualquier caso, en el análisis del ciclo de vida, los sistemas de ventilación natural son más ventajosos en las tres situaciones.

Otras circunstancias que se identifican con la falta de operatividad de los sistemas mecánicos de ventilación se relacionan directamente con el usuario y la operación del edificio. Así, Chenari et al. (Chenari et al., 2016) identifican entre las causas por las que los SVM no son puestos en funcionamiento por el usuario del edificio: el coste, el ruido que producen los sistemas o la dificultad de operación.

## 2.3 Los contaminantes y la tasa de ventilación

### 2.3.1 Los contaminantes

Las fuentes que originan los contaminantes en los espacios cerrados pueden ser de diversa índole y naturaleza, como los materiales de construcción (suelos, pinturas o barnices), el mobiliario, o los productos químicos y de limpieza. BUILD UP (The European Portal for energy efficiency in buildings) ("BUILD UP. The European Portal for Energy Efficiency in Buildings," n.d.) identifica como más significativos: los contaminantes de las personas que producen efluentes humanos, las emisiones del tabaco, la combustión, los materiales de construcción, los muebles, los productos de limpieza, los gases procedentes del subsuelo y los microbios. Awbi por su parte los clasifica en tres grupos principales (H. B. Awbi, 2008): i) Fuentes exteriores (como el tráfico o la industria); ii) Actividades y productos relacionados con los ocupantes como el humo de tabaco, el equipamiento (impresoras láser y otros), o los productos de consumo (de limpieza, de higiene y cuidado personal); iii) Materiales de construcción y mobiliario de los edificios como aislamientos, pinturas, contrachapados, mobiliario (tableros de partículas), revestimientos de suelos y paredes, etc...y los sistemas de ventilación. Esta y otras publicaciones (Jaboyedoff, Roulet, Dorer, Weber, & Pfeiffer, 2004), identifican los SVM también como una posible fuente de contaminante si no se realiza el adecuado mantenimiento, identificándose con el origen del síndrome del edificio enfermo (SBS) (H. B. Awbi, 2008; ECA Urban air indoor environment and human exposure, 2003; Redlich et al., 1997).

Incluso el propio usuario puede ser una fuente de emisión, produciendo humedad y CO<sub>2</sub>. En cualquier caso, de acuerdo con diferentes autores, el CO<sub>2</sub> no debe considerarse como un gas nocivo en las concentraciones habituales aun en espacios de alta densidad de ocupación, aunque niveles por encima de 5000 ppm puedan ser sinónimo de una concentración baja de oxígeno en el aire (Hazim B Awbi, 1998). El nivel del CO<sub>2</sub> sin embargo, aun cuando no sea un contaminante en sí mismo, suele emplearse como un buen indicador de calidad del aire, ya que sus niveles bajos indican una buena ventilación del espacio y es un elemento fácil de medir en la práctica (Ramalho et al., 2015). En cualquier caso, Ramalho et al (Ramalho et al., 2015), concluyen que incluso con niveles bajos de concentración de CO<sub>2</sub>, para garantizar una adecuada CAI es necesario reducir las fuentes de emisión de contaminantes.

El estándar ASHRAE 62.1 (Ventilación para una Calidad Aceptable de Aire Interior) (ASHRAE, 2009), identifica diferentes tipos de contaminantes, diferenciando para ambiente interior y exterior, así como algunos específicamente identificados para entornos industriales. En la Fig.1.23 se reproduce la tabla B-1 donde se recogen los contaminantes y límites según las diferentes reglamentaciones. Se ha señalado en rojo aquéllos relativos a uso no industrial recogidos en las normas NAAQS (estándares de aire exterior desarrollados por la EPA (Environmental Protection Agency) de EEUU) Y WHO/Europe (guías ambientales (no industriales desarrolladas por la oficina para Europa. Propuesta para exposiciones interiores y exteriores).

Obsérvese cómo el CO<sub>2</sub> no se identifica como un contaminante del ambiente interior. En las normas del ámbito industrial si se recogen unos niveles determinados, porque puedan ser producto del propio proceso productivo del que se trate, que dependerá de la industria.

**TABLA B-1 Comparación de regulaciones y guías pertinentes a ambientes interiores**  
(El usuario de cualquier valor en esta tabla debe tener en cuenta el propósito para el cual fue adoptado y los medios para los cuales fue desarrollado)

	Niveles de exigencia y/o regulatorios			Niveles de guías y referencias que no son de exigencia			
	NAAQS/EPA (Ref. B-4)	OSHA (Ref. B-5)	MAK (Ref. B-2)	Canadian (Ref. B-8)	WHO/Europe (Ref. B-11)	NIOSH (Ref. B-13)	ACGIH (Ref. B-1)
Dióxido de carbón		5000 ppm	5000 ppm 10,000 ppm [1 h]	3500 ppm [L]		5000 ppm 30,000 ppm [15 min]	5000 ppm 30,000 ppm [15 min]
Monóxido de carbón <sup>c</sup>	9 ppm <sup>e</sup> 35 ppm [1 h] <sup>e</sup>	50 ppm	30 ppm 60 ppm [30 min]	11 ppm [8 h] 25 ppm [1 h]	90 ppm [15 min] 50 ppm [30 min] 25 ppm [1 h] 10 ppm [8 h]	35 ppm 200 ppm [C]	25 ppm
Formaldehído <sup>b</sup>		0.75 ppm 2 ppm [15 min]	0.3 ppm 1 ppm <sup>d</sup>	0.1 ppm [L] 0.05 ppm [L] <sup>b</sup>	0.1 mg/m <sup>3</sup> (0.081 ppm) [30 min] <sup>p</sup>	0.016 ppm 0.1 ppm [15 min]	0.3 ppm [C]
Plomo	1.5 µg/m <sup>3</sup> [3 meses]	0.05 mg/m <sup>3</sup>	0.1 mg/m <sup>3</sup> 1 mg/m <sup>3</sup> [30 min]	Minimizar exposición	0.5 µg/m <sup>3</sup> [1 a]	0.050 mg/m <sup>3</sup>	0.05 mg/m <sup>3</sup>
Dióxido de nitrógeno	0.05 ppm [1 a]	5 ppm [C]	5 ppm 10 ppm [5 min]	0.05 ppm 0.25 ppm [1 h]	0.1 ppm [1 h] 0.02 ppm [1 a]	1 ppm [15 min]	3 ppm 5 ppm [15 min]
Ozono	0.12 ppm [1 h] <sup>f</sup> 0.08 ppm	0.1 ppm	j	0.12 ppm [1 h]	0.064 ppm (120 µg/m <sup>3</sup> ) [8 h]	0.1 ppm [C]	0.05 ppm <sup>k</sup> 0.08 ppm <sup>l</sup> 0.1 ppm <sup>m</sup> 0.2 ppm <sup>n</sup>
Partículas <sup>c</sup> <2.5 µm MMAD <sup>d</sup>	15 µg/m <sup>3</sup> [1 a] <sup>o</sup> 65 µg/m <sup>3</sup> [24 h] <sup>o</sup>	5 mg/m <sup>3</sup>	1.5 mg/m <sup>3</sup> for <4 µm	0.1 mg/m <sup>3</sup> [1 h] 0.040 mg/m <sup>3</sup> [L]			3 mg/m <sup>3</sup> [C]
Partículas <sup>c</sup> <10 µm MMAD <sup>d</sup>	50 µg/m <sup>3</sup> [1 a] <sup>o</sup> 150 µg/m <sup>3</sup> [24 h] <sup>o</sup>		4 mg/m <sup>3</sup>				10 mg/m <sup>3</sup> [C]
Radón				800 Bq/m <sup>3</sup> [1 a]			
Dióxido de azufre	0.03 ppm [1 a] 0.14 ppm [24 h] <sup>f</sup>	5 ppm	0.5 ppm 1 ppm <sup>i</sup>	0.38 ppm [5 min] 0.019 ppm	0.048 ppm [24 h] 0.012 ppm [1 a]	2 ppm 5 ppm [15 min]	2 ppm 5 ppm [15 min]
Total Partículas <sup>c</sup>		15 mg/m <sup>3</sup>					

Fig.1.23 Contaminantes según el estándar ASHRAE 62.1. Reproducido de (ASHRAE, 2009)

A su vez, la concentración de CO<sub>2</sub> la relaciona con los biofluentes humanos en espacios ocupados por las personas, según se muestra en la Fig.1.24. Del mismo modo, Persily (Persily, 2015) afirma que los límites de CO<sub>2</sub> recogidos en los estándares de ventilación están relacionados con ratios recomendados de ventilación para controlar el olor corporal bajo condiciones ideales de estado estacionario, no con el impacto en la salud o el confort.

**TABLA B-2 Concentración de interés para contaminantes seleccionados (Continuación)**  
(Nota: Los números de referencia que están indicados por [c] y [m] presenta las concentraciones de interés [c] y los métodos de medición [m].)  
(Nota: El usuario de cualquier valor en esta tabla debe tener en cuenta el propósito para el cual fue adoptado y los medios por los cuales fue desarrollado.)

Contaminante	Fuentes	Concentraciones de interés	Comentarios	Referencias
Plomo (Pb)	Polvo de pintura Aire exterior	1.5 mg/m <sup>3</sup>	Basado en el efecto adverso en el funcionamiento neuro-sicológico en niños, exposición promedio para tres meses (WHO: 0.5-1 mg/m <sup>3</sup> para 1 año). Fuentes—Gasolina con plomo (en proceso de eliminación), pintura (casas, carros), fundiciones, refineries (metal refineries), manufactura de baterías de almacenamiento de plomo. Efectos sobre la salud—Daño en el cerebro y otros sistemas nerviosos; los niños están bajo riesgo especial. Algunos químicos que contienen plomo ocasionan cáncer en animales. El plomo ocasiona problemas en la digestión y en otros aspectos de la salud. Afectos ambientales—El plomo puede ocasionar daño a la vida animal salvaje.	B-4 [c] B-4 [m] B-18
Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	Fugas en la toma de aire de equipos de combustión Equipos de combustión sin tomas de aire Aire exterior	100 µg/m <sup>3</sup>  470 µg/m <sup>3</sup>	Basado en proveer protección contra efectos respiratorios adversos, exposición promedio para un año. Fuentes—Quema de gasolina, gas natural, carbón, aceite, etc. Los carros son una fuente importante de NO <sub>2</sub> exteriores, cocción y agua – y equipos de calefacción ambiental con importantes fuentes interiores. Efectos sobre la salud—Daños en los pulmones, enfermedad de las vías respiratorias y pulmones (sistema respiratorio). Efectos en el ambiente—El dióxido de nitrógeno es un componente de la lluvia ácida (aerosoles ácidos), que pueden dañar árboles y lagos. Los aerosoles + ácidos pueden reducir la visibilidad. Daños a las propiedades—Aerosoles ácidos pueden carcomer piedras empleadas en las construcciones, estatuas y monumentos, etc. 24-horas promedio para prevenir altas exposiciones durante el uso de equipos de combustión tales como calefactores en ambientes y cocinas de gases.	B-4 [c] B-9 [m] B-18  B-43
Olores	Ocupantes Fuentes de VOC (incluyendo fuentes de hongos que forman moho) Cocción, procesamiento de alimentos, tratamientos residuales y plantas de biodesperdicio, etc.	Aceptabilidad predecida (o medida) para el 80% o más de los ocupantes o visitantes	Concentración de CO <sub>2</sub> puede ser usado como un derivado de olores de ocupantes (olores biofluentes). Ver el anexo C para analizar los niveles de CO <sub>2</sub> en interiores y ratas de ventilación. Para otras fuentes diferentes de personas se recomienda realizar control en la fuente.	B-12, 24, 29, 30 [c] B-9 (CO <sub>2</sub> ), B-15 (olor) [m]

Fig.1.24 Concentración de contaminantes según el estándar ASHRAE 62.1. Reproducido de (ASHRAE, 2009)

En cuanto a la relación entre los contaminantes y el tipo de sistema de ventilación empleado, Waring y Ben-David (Ben-david, Waring, Ben-david, & Waring, 2016) estudian comparativamente el impacto de la ventilación natural vs la ventilación mecánica en la calidad del aire interior y el consumo de energía en oficinas en catorce ciudades de los EE.UU, obteniendo como resultado que el PM<sub>2.5</sub> fue el único contaminante presente por el uso de ventilación natural frente a la ventilación mecánica. A su vez, como hemos visto en el apartado anterior, el propio sistema de ventilación mecánica puede ser una fuente de contaminantes en sí mismo, si no se mantiene adecuadamente.



### 2.3.2 La tasa de ventilación

El criterio que se suele determinar para identificar la adecuada ventilación es la tasa de ventilación. Hay normas como ASHRAE 62, cuyo objetivo establecer ratios mínimos de ventilación y controlar los contaminantes en origen. Esta estrategia es también recomendada por la OMS (WHO, 2010; WHO Europe, n.d.). No obstante, el control de las fuentes es difícil, y tal como se recoge en el proyecto Urbvent (Germano et al., 2004), las tasas de renovación de aire se han ido modificando a lo largo del tiempo (Hazim B Awbi, 1998).

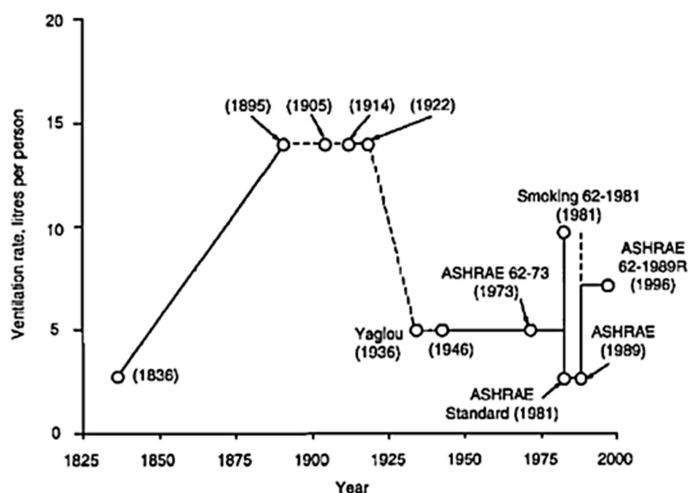


Fig.1.25 Variación de la tasa mínima de ventilación en USA. Reproducido de (Hazim B Awbi, 1998)

Esta modificación de la tasa de ventilación en los edificios, junto con la de los estándares de calidad del aire se ha producido en función del avance del conocimiento. Persily lo estudia con el estándar ASHRAE 62 como marco de referencia (Persily, 2015).

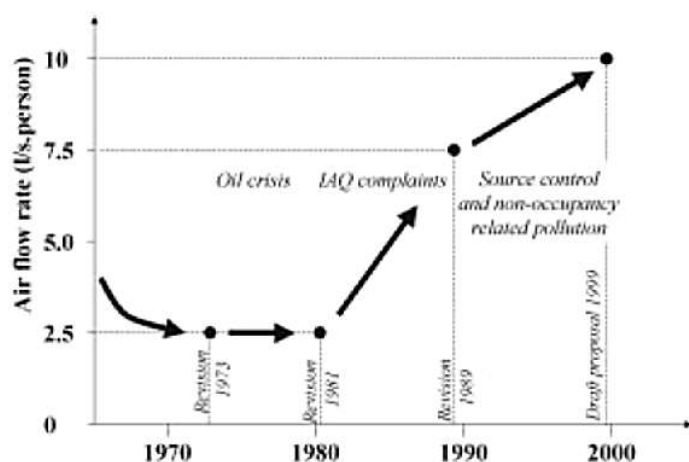


Fig.1.26. Evolución de los requerimientos de ventilación según ASHRAE 62. Reproducido de (ECA Urban air indoor environment and human exposure, 2003)

Según el Report nº 23 de ECA (ECA Urban air indoor environment and human exposure, 2003), aunque este es el punto de partida común, hay múltiples variaciones en los estándares de los distintos países con respecto a las especificaciones. Esto puede explicarse en parte por el peso relativo que se le da a cada factor en cada localización, de modo que factores externos como pueden ser temas energéticos o consideraciones ambientales u otros nuevos hallazgos de la investigación (impacto en la salud e impacto económico de una CAI inadecuada), no están recibiendo la misma importancia en todos los países.

Actualmente, la mayoría de los estándares están directa o indirectamente relacionados con las investigaciones de Pettenkofer and Yaglou, con el CO<sub>2</sub> como gas trazador o indicador como base. En estos casos la tasa de ventilación se define en términos de concentración de CO<sub>2</sub> en ppm del volumen de aire.

## 2.4 Investigación relacionada con la ventilación

La actividad de investigación en el ámbito de las tecnologías de ventilación es intensa a nivel internacional. Se han identificado grupos y redes de investigación especializados en la materia, así como numerosos artículos científicos, publicaciones y proyectos.

### 2.4.1 Asociaciones y redes de investigación

Dentro de los grupos de investigación, los hay que investigan la ventilación como concepto general IAQA ("Indoor Air Quality Association," n.d.), REHVA ("Inive / International Network for Information on Ventilation and Energy Performance," n.d.), AIVC (AIVC, 2018) o en el marco de los sistemas HVAC y otros que se centran específicamente en las estrategias de ventilación natural CIBSE "Natural Ventilation Group" ("CIBSE - Natural Ventilation Group," n.d.).

Este último, integrado en CIBSE ("CIBSE - Chartered Institution of Building Services Engineers," n.d.), desempeña un papel relevante, con técnicos e investigadores expertos en la materia, así como numeroso material de investigación y guías de diseño.

**Tabla 1.2.** Proyectos de investigación relacionados con la ventilación

Proyecto	Contenidos
AIRLESS (Jaboyedoff et al., 2004)	Proyecto europeo de tres años que comenzó en 1998. Objetivo desarrollar estrategias, principios y protocolos para mejorar y controlar el rendimiento de los sistemas HVAC y sus componentes para su incorporación en códigos y normativas. Doce institutos, universidades y empresas de siete países europeos participan en este proyecto. El programa europeo AIRLESS se inició para identificar las fuentes de contaminación en las unidades de tratamiento de aire y caracterizarlas utilizando protocolos de medición, con el fin de proponer medidas para evitar o eliminar esta contaminación. Aborda también el uso de energía en las unidades de tratamiento de aire y propone diversas soluciones de eficiencia energética para proporcionar un aire interior adecuado. Una de las estrategias de refrigeración que proponen, eficiente y económica, consiste en combinar un sistema de ventilación mecánico diseñado para la tasa de flujo de aire mínima con enfriamiento pasivo nocturno utilizando ventilación natural. Uno de los principales resultados que se obtiene es la contaminación que se produce en los conductos y en los recuperadores debido a la falta de mantenimiento.
AIOLOS	Este proyecto se desarrolla en el marco del programa europeo ALTENER, y los resultados obtenidos se presentan como un libro de recomendaciones para el diseño de sistemas de ventilación natural en los edificios, en el que se desarrolla un software de cálculo para usar en los estadios primeros de diseño ("Natural ventilation in buildings: a design handbook" (Allard et al., 1998) del año 1998).
ADVENT PROJECT	Presenta ejemplos de tecnologías de ventilación en relación con ahorros de energía y garantizando la calidad del aire y térmica en diferentes zonas climáticas de Europa, se presenta en (Kumitski et al., 2009) el congreso 9th International Conference and Exhibition-Healthy Buildings 2009, HB 2009. También participado por REHVA (Heating & Associations, n.d.).
URBENT "Natural ventilation in Urban Areas" (UNIVERSITE DE LA ROCHELLE et al., n.d.)	Analiza la ventilación natural como una alternativa al aire acondicionado, adecuada para el clima europeo y eficiente desde el punto de vista de la energía. Para que esta se pueda aplicar en el diseño de los edificios hay que tener en cuenta determinados aspectos del diseño de las fachadas, dimensionamiento y ubicación de aberturas, etc... En este proyecto también se analiza la interacción entre los edificios y el medio urbano, buscando una metodología para el análisis de la viabilidad de la ventilación natural. Se desarrolló de 2001 a 2003 y participaron universidades de Francia, Bélgica, Reino Unido, Grecia, Portugal y Suiza. Como resultado, se publicaron entre otros (Germano et al., 2004) en el que se analizaba el potencial del diseño óptimo de las fachadas y (Ghiaus, Allard, Santamouris, & Georgakis, 2003), donde se daban recomendaciones en relación al diseño de aberturas en las fachadas. En él utilizan el "AIOLOS network software tool" obteniendo buenas correlaciones con resultados reales.

En la Tabla 1.3 se muestra una relación no exhaustiva de diferentes redes y asociaciones con un alto grado de especialización en sistemas de ventilación, entre los que se encuentran los de ventilación natural.

**Tabla 1.3.** Principales asociaciones y redes especializadas en ventilación, Calidad del Aire Interior y hermeticidad

Nombre	Objeto
IAQA Indoor Air Quality Association ("Indoor Air Quality Association," n.d.)	Se dedica a unir a los profesionales para prevenir y resolver problemas ambientales de los espacios interiores en beneficio de los consumidores y el público.
INIVE International network for information on Ventilation and Energy Performance ("Inive / International Network for Information on Ventilation and Energy Performance," n.d.)	Su objetivo es desarrollar sistemas inteligentes para proporcionar al mundo de la construcción un conocimiento útil en el área de eficiencia energética, el clima interior y ventilación, así como normativas sobre rendimiento energético de los edificios y la implementación de la Directiva Europea de Rendimiento Energético de Edificios. INIVE EEIG ( <a href="http://www.inive.org">www.inive.org</a> ) es la red internacional para información sobre ventilación y eficiencia energética y está compuesta por las organizaciones líderes en el sector de la edificación (BBRI, CETIAT, CIMNE, CSTB, ENTPE, Fraunhofer-IBP, SINTEF, NKUA, TNO, USACE). Sus objetivos son múltiples e incluyen el compendio y transferencia de información relevante in el ámbito del ambiente interior, ventilación, eficiencia energética y normativas sobre comportamiento energético de los edificios.
REHVA (Heating & Associations, n.d.)	Es la federación de asociaciones europeas de calefacción, ventilación y aire acondicionado. Su principal objetivo es conectar a los profesionales europeos en el ámbito de los servicios de ingeniería de edificios y desarrollar y difundir tecnología para los servicios mecánicos de los edificios económica, saludable y eficiente desde el punto de vista energético.
AIVC Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC, 2018)	Es el centro oficial de información de la Agencia Internacional de Energía sobre ventilación e infiltración en los edificios. Su principal enfoque es la ventilación, el clima interior, la energía en edificios y la tecnología y física relacionadas con la construcción. Inaugurado en 1979, ofrece un amplio abanico de servicios, incluyendo publicaciones, un congreso anual y una publicación. AIVC (Air Infiltration and Ventilation Centre - <a href="http://www.aivc.org">www.aivc.org</a> )
VENTICOOL The European platform for Ventilative Cooling (Venticoool, 2018) (International Energy Agency's Energy in Buildings and Communities, n.d.)	Tiene como objetivo reunir recursos para acelerar el proceso de aprendizaje, así como la ventilación natural y mecánica. Vinculado con EBC Energía en edificios y programa comunitario de la Agencia Internacional de Energía IEA.
TightVent Europe the building and ductwork air-tightness platform ("TightVent Europe. Building and ductwork airtightness platform," n.d.)	Trabaja en la importancia de la hermeticidad en la energía Zero Energy Buildings. Aprovechar las lecciones aprendidas de un trabajo pionero ayudará a mejorar la calidad de la hermeticidad, teniendo en cuenta la necesidad de una ventilación adecuada
ASHRAE American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers ("ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers," n.d.)	Es una sociedad global que promueve el bienestar humano a través de tecnología sostenible para el entorno construido. Se centran en sistemas de construcción, eficiencia energética, calidad del aire interior, refrigeración y sostenibilidad dentro de la industria
CIBSE The chartered Institution of Building Services Engineers ("CIBSE - Chartered Institution of Building Services Engineers," n.d.) ("CIBSE - Natural Ventilation Group," n.d.)	Está constituido por un cuerpo profesional para apoyar la ciencia, el arte y la práctica de la ingeniería de servicios de construcción. Publica Guías y códigos que son reconocidos internacionalmente y establece los criterios para las mejores prácticas en la profesión. Natural ventilation group/ School design group

## 2.4.2 Proyectos de investigación

En cuanto a resultados concretos de investigación, numerosos proyectos analizan la cuestión de la ventilación desde el punto de vista tanto del diseño de los edificios (Aiolo, Advent) como urbano (Urbvent). En Airless además, se analiza específicamente la problemática asociada a las fuentes de contaminación producidas por las UTAs.

Se han identificado como más relevantes los siguientes que se relacionan a continuación en la Tabla 1.3 (Allard et al., 1998; Jaboyedoff et al., 2004; Kurnitski, Kolokotroni, Farrou, & Warren, 2009; UNIVERSITE DE LA ROCHELLE et al., n.d.)

### 3.- Los Sistemas de Ventilación Natural

#### Resumen

Este apartado se desarrolla en 6 puntos que abordan los aspectos más destacables de la VN, como estrategia de diseño pasivo para mejorar la sostenibilidad de los edificios y como tecnología actualmente accesible. Desde el primer enfoque, se muestra cómo estas estrategias de diseño pasivo se utilizan como herramientas de control de la calidad del aire en el interior y de refrigeración pasiva, constituyendo una alternativa a los sistemas mecánicos. Según el segundo enfoque, estas estrategias constituyen un tipo de tecnología que desarrolla sistemas que utilizan el principio de la ventilación natural. A su vez, estos sistemas pueden diseñarse, calcularse y dimensionarse con herramientas informáticas accesibles comercialmente y de creciente difusión. En el desarrollo del capítulo se comienza con la definición del concepto y se enuncian sus principios generales de funcionamiento, para a continuación detallarse las distintas estrategias de ventilación natural más habituales en función de las condiciones de diseño. Se describen también las características que identifican la ventilación natural como una oportunidad de ahorro de energía y de mejora de la sostenibilidad de los edificios, analizándose los aspectos de diseño y cálculo de este tipo de sistemas en el marco de la normativa actual. Por último, se relacionan diferentes herramientas informáticas identificadas para el cálculo y simulación, así como se enmarca esta tecnología en el campo de la investigación científica actual según la base Scopus, así como se encuadra dentro de la normativa nacional e internacional. Finalmente se muestran ejemplos representativos y casos prácticos construidos en diversas localizaciones.

#### 3.- Los Sistemas de Ventilación Natural

3.1	Principios generales .....	73
3.1.1	Definición .....	73
3.1.2	La utilización de la VN en edificación .....	73
3.1.3	Fundamentos físicos de funcionamiento .....	74
3.1.4	Principios de diseño .....	75
3.2	Estrategias de ventilación .....	77
3.2.1	Clasificación .....	77
3.2.2	Tamaño y tipo de ventanas .....	80
3.2.3	El papel del clima y el viento en la ventilación natural .....	82
3.3	Los SVN como medio de ahorro de energía .....	84
3.4	La ventilación en la normativa actual .....	85
3.4.1	Investigación y desarrollo de los SVN .....	86
3.4.2	Regulación internacional .....	87
3.4.3	Normativa nacional .....	88
3.5	Herramientas de cálculo y simulación .....	89
3.6	Selección de casos .....	92
3.6.1	Soluciones comerciales .....	92
3.6.2	Edificios .....	93



## 3.1 Principios generales

### 3.1.1 Definición

Según Cheng et al, la VN es un proceso que se realiza para reemplazar el aire interior por aire fresco sin utilizar medios mecánicos (Cheng, Qi, Katal, Wang, & Stathopoulos, 2018). Etheridge se basa en el aspecto de la envolvente para su definición (Etheridge, 2014). Según este autor, un edificio que se ventila naturalmente es aquél en el que la ventilación se produce a través de las aberturas en la envolvente, como resultado de las presiones generadas a través de las ellas por la acción del viento y el empuje de la presión por la diferencia de temperaturas. Awbi (H. B. Awbi, 2008) por su parte afirma que estos sistemas permiten proporcionar aire fresco a los ocupantes de los edificios, necesario para mantener un nivel adecuado de calidad del aire interior, así como refrigerar el edificio, si las condiciones climáticas lo permiten. Considerando todo lo anterior, según Allard et al. (Allard et al., 1998), la VN se utiliza en los edificios para controlar la CAI, la temperatura, y para introducir aire fresco en el espacio interior y producir la dilución de los contaminantes interiores.

Este tipo de ventilación se incorpora en los edificios de manera intencionada, mediante sistemas que se diseñan y dimensionan como cualquier otro tipo de instalaciones, para lo que se estudia la posición del edificio en relación a los vientos dominantes y se ubican y dimensionan las aberturas y salidas de aire determinando así su vía de circulación. Por tanto, estos sistemas no deben confundirse con las meras infiltraciones que se pueden producir a través de los elementos constructivos de la envolvente, que dependen del grado de hermeticidad de las mismas y son incontroladas y difícilmente cuantificables.

### 3.1.2 La utilización de la VN en edificación

La ventilación por medios naturales ha sido tradicionalmente utilizada en los edificios, pero a partir de la segunda mitad del siglo XX ha ido siendo desplazada por los sistemas mecánicos, que se han generalizado por el desarrollo de la tecnología. El origen de esta situación, según el análisis que realiza Etheridge (Etheridge, 2014) se sitúa en los años '70, en corrientes de investigación lideradas por países de clima severo, como los escandinavos y EEUU. El autor describe el cambio de tendencia que se produjo en Reino Unido, donde tradicionalmente los edificios se ventilaban naturalmente (en invierno por infiltraciones y en verano con ventanas practicables), poniendo el foco en la crisis energética de los años '70, cuando los países de clima frío comenzaron una intensa labor de investigación para el cálculo y medida de las infiltraciones en los edificios. Esto supuso un gran cambio en la mentalidad en el Reino Unido, lo cual llevó a la consigna "*Build tight, Ventilate right*", que refleja el hecho de que construir con elevados niveles de hermeticidad no era suficiente por cuestiones de calidad del aire, confort y seguridad, para lo cual era necesario proporcionar la ventilación de manera "expresa". Esto llevó a una intensa labor de investigación por todo el mundo que continúa a día de hoy.



Fig.1.27 Ventanas diseñadas para ventilación. (fuente: propia)

Passe y Bataglia (Passe & Battaglia, 2015), identifican entre las diversas causas de este cambio un aparente vacío entre el conocimiento de los ingenieros sobre ventilación natural y su efectiva integración en los espacios diseñados por los arquitectos, así como la complejidad del cálculo termodinámico.

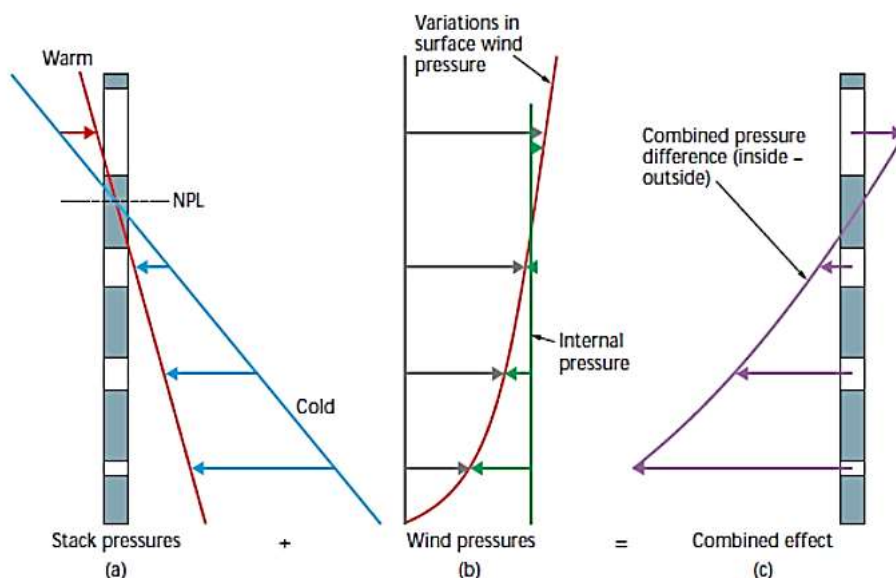
Según otros autores como Santamouris y Wouters (M. (Matheos) Santamouris & Wouters, 2006) y Awbi (H. B. Awbi, 2008), las barreras que se encuentran este tipo de sistemas para ser implementados en edificación, se encuentran tanto en el ámbito del diseño del propio edificio (ruido exterior, seguridad, bloqueo por las protecciones solares...), hasta el desconocimiento del usuario ante la forma de uso de los mismos. Por otro lado, la falta de suficientes herramientas de diseño y adecuadas regulaciones técnicas dificultan su inclusión, a lo cual cabe añadir según Santamouris et al. (Allard et al., 1998) que el diseño de estos sistemas requiere más trabajo que la alternativa de un sistema mecánico, pero supone menores honorarios, ya que el sistema en sí es mucho menos costoso que uno mecánico, lo cual, junto con el riesgo que asume el proyectista, hace que no se incentive su desarrollo.

### 3.1.3 Fundamentos físicos de funcionamiento

La ventilación natural se produce por dos tipos de fuerzas naturales: la acción del viento y el tiro natural por diferencia de temperatura (efecto stack) (Allard et al., 1998; Carrilho & Linden, 2016; Etheridge, 2012; Khan et al., 2008), gracias a lo cual el aire se mueve y circula sin consumo de energía.

El movimiento del aire en el interior se produce por las presiones generadas por las diferencias internas de temperatura y entre la entrada y la salida (Etheridge, 2014). En su funcionamiento, según Linden (Linden, 1999), se produce un flujo generado por las diferencias de temperatura y por el viento, siendo la característica que rige este flujo el intercambio entre un espacio interior y el ambiente externo.

Por otro lado, el movimiento del aire por efecto “stack” se produce cuando la diferencia de temperatura entre la zona concreta y el medio adyacente (otra zona o el exterior), produce que el aire caliente más ligero ascienda y fluya fuera de la zona cálida, mientras que el aire a menor temperatura lo sustituye. El efecto chimenea se produce en edificios altos, en particular en zonas con conexiones verticales como las cajas de escalera, ascensores o patinillos (shafts). En este caso, el flujo de aire se incrementa al aumentar la diferencia de temperatura (Allard et al., 1998).



**Fig.1.28** Efecto combinado del viento y la diferencia de presiones- Reproducido de (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005)

En la mayoría de los casos, el movimiento del aire se produce por la acción del viento y por la diferencia de presiones simultáneamente, según se indica en (Nitawichit, Khunatorn, & Tippayawong, 2008) by Nitawichit et al. y otros como Carrilho da Graça y Linde (Carrilho & Linden, 2016). Estos principios se definen por las ecuaciones de Navier Stokes, representados en la Fig.1.29

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \, d\omega + \int_{\Sigma} \rho \, \vec{v} \cdot \vec{n} \, d\sigma &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \, \vec{v} \, d\omega + \int_{\Sigma} \rho \, \vec{v} \, \vec{v} \cdot \vec{n} \, d\sigma &= \int_{\Sigma} -p \, \vec{n} \, d\sigma + \int_{\Sigma} \vec{\tau}' \cdot \vec{n} \, d\sigma + \int_{\Omega} \rho \, \vec{f}_m \, d\omega \\ \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Delta\Omega} \rho \, e \, d\omega + \int_{\Delta\Sigma} \rho \, e \, \vec{v} \cdot \vec{n} \, d\sigma &= \int_{\Delta\Omega} -p \, \vec{\nabla} \cdot \vec{v} \, d\omega + \int_{\Delta\Sigma} k \, \vec{\nabla} T \cdot \vec{n} \, d\sigma + \int_{\Delta\Omega} (\phi_r + \phi_v + \phi_q) \, d\omega \end{aligned}$$

Fig.1.29. Ecuaciones de Navier-Stokes

Según Etheridge (Etheridge, 2014), la ventilación natural es fundamentalmente diferente de la ventilación mecánica, debido a su fuerte dependencia de las condiciones climáticas. Sin embargo, los modelos teóricos y los métodos experimentales desarrollados para la ventilación mecánica a menudo se aplican a la ventilación natural asumiendo condiciones de flujo estables (es decir, condiciones que varían lentamente), lo cual es fundamental tenerlo presente a la hora de abordar su diseño y dimensionamiento en un edificio.

Los principios de funcionamiento y los algoritmos y simplificaciones de cálculo aceptados en la literatura científica se encuentran descritos en diversas publicaciones (Germano et al., 2004; M. (Matheos) Santamouris & Wouters, 2006; Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005).

### 3.1.4 Principios de diseño

Los sistemas de ventilación natural (SVN) deben integrarse desde el primer momento de diseño del edificio (M. (Matheos) Santamouris & Wouters, 2006), siendo más compleja y menos efectiva su implementación en edificios ya diseñados sin criterios de VN.

Existe una amplia literatura técnica y científica relacionada con la materia, entre la que se pueden encontrar publicaciones y manuales de diseño. Autores, como Allard et al. (Allard et al., 1998) definen las características y ventajas de estos sistemas. La información recogida en esta publicación se recopiló en el marco de estudio y desarrollo del proyecto europeo AIOLOS (Altener program) y proporcionan con este libro un software para el diseño de la VN en los edificios. Otros autores profundizan en el tema, como Santamouris y Wouters (M. (Matheos) Santamouris & Wouters, 2006) o Etheridge (Etheridge, 2012), estableciendo pautas útiles para los nuevos investigadores en este campo. Este último presenta una amplia perspectiva de la investigación en este campo en los últimos 50 años (Etheridge, 2014) e identifica aspectos clave del diseño tales como distintos modelos de flujo a través de la envolvente, los tipos de aberturas y la forma de circulación interna del aire. Xiao et al. (Xiao-Yu Maa, Yue Penga, Fu-Yun Zhaoa, \*, Cheng-Wei Liua, 2017) brindan también con sus conclusiones determinadas pautas y recomendaciones para el diseño de edificios con ventilación natural en relación a la posición de las aberturas para la circulación del aire. Heiselberg et al. (Heiselberg, 2017) exponen las principales bases para el diseño de la VN en edificios desde un enfoque del diseño climático integrado.

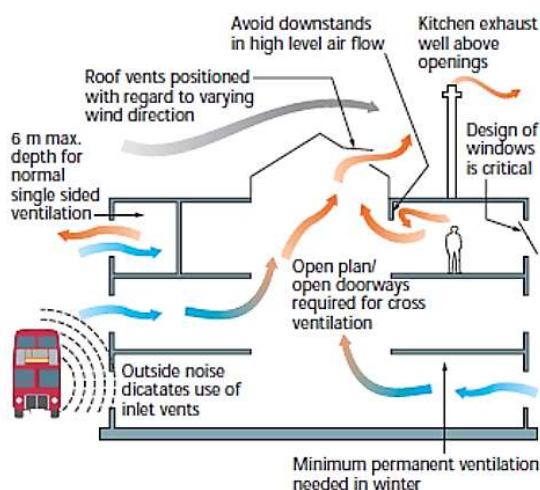


Fig.1.30. Condicionantes de diseño de la VN. Reproducido de (Steve Irving, Brian Ford &amp; (CIBSE), 2005)

La guía AM10 (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005) de CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineers., 2014; “CIBSE - Chartered Institution of Building Services Engineers,” n.d.; “CIBSE - Natural Ventilation Group,” n.d.) proporciona recomendaciones prácticas para incluir los SVN en los edificios de uso no residencial. Según esta publicación, por un lado los sistemas de ventilación natural deben diseñarse con dos objetivos clave desde el punto de vista ambiental: i) ventilación para mantener unos niveles adecuados de calidad del aire interior, y ii) ventilación para reducir la tendencia de los edificios al sobrecalentamiento, especialmente en verano. Por otro lado, la estrategia de VN que se desarrolle, debe analizarse conjuntamente con otros aspectos de diseño del edificio, tales como: i) condiciones acústicas, ii) condiciones de protección contra incendios, iii) salubridad y seguridad.

En cuanto a la tasa de renovación de aire, clave en el diseño de una estrategia de “Whole-building ventilation” (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005), se subraya el carácter dinámico de la VN en comparación con los SVM. Así, los SVN deben permitir proporcionar ratios de ventilación variables y controlables en un rango amplio de entre 0.5 y 5 ACH (air changes). Para ilustrar esto, en AM10 (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005) se analizan comparativamente ambos sistemas en un espacio diseñado para 1,2 ACH (renovaciones/hora) con una base de infiltración de 0,1 ACH. En el caso de la VM es constante a lo largo del día, mientras que en el de la VN varía, adaptándose desde 0,25 ACH a 1 ACH y 1,5 ACH.

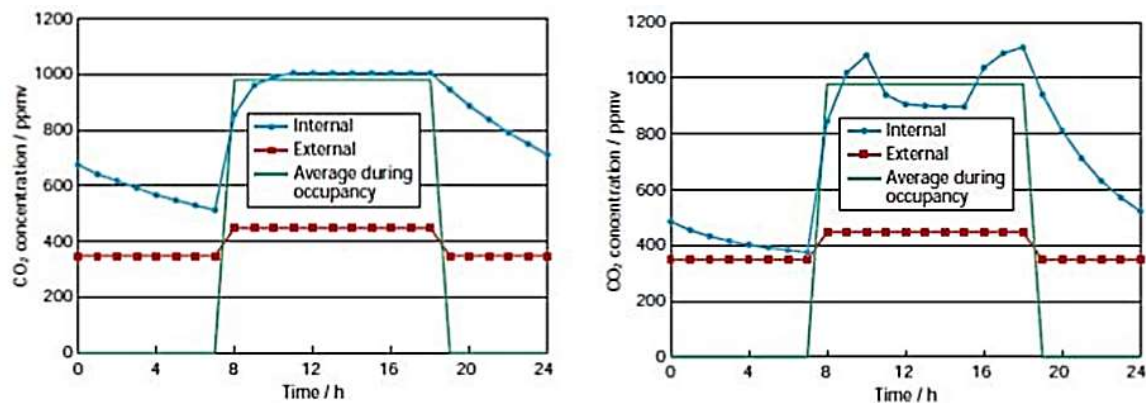
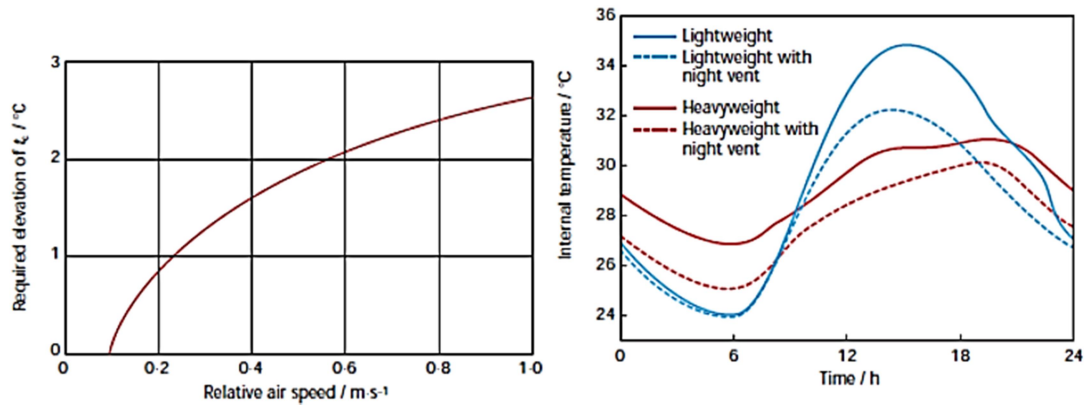


Fig.1.31. Comparación entre ventilación mecánica constante (izda.) y ventilación natural variable (dcha.). Reproducido de (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005)

Otro aspecto a tener en cuenta en el diseño es el sobrecalentamiento de los espacios (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005). Para ello, deben tenerse en cuenta tanto las ganancias internas como las debidas a la radiación solar, por lo que en el diseño y uso del edificio deberán integrarse conceptos tales como: i) buen control solar para evitar las excesivas ganancias internas en el interior; ii) limitar las ganancias internas de equipos, ocupación e iluminación, iii) aceptar que en situaciones de pico térmico en verano, las temperaturas interiores excederán los 25°C en determinados momentos.

Debe tenerse en cuenta que un edificio ventilado naturalmente proporcionará una temperatura más variable que uno con aire acondicionado, pero esto no tiene por qué significar un menor confort para los ocupantes (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005). Así, en verano, un mayor movimiento del aire puede mejorar la percepción del confort térmico. Esto puede mejorarse aún más utilizando estrategias de ventilación nocturna, refrescando la estructura por la noche y reduciendo la temperatura radiante. Esta estrategia está además íntimamente relacionada con la masa térmica del edificio.



**Fig.1.32.** Efecto de la velocidad del viento en la temperatura (izda.) y de la masa en la inercia térmica (dcha.) Reproducido de (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005)

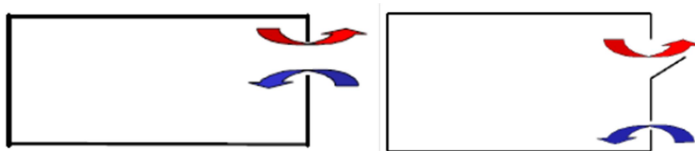
Por otro lado, debe tenerse en cuenta que no todas las partes del edificio tienen las mismas necesidades de ventilación, por lo que no requieren el mismo tratamiento. El uso de diferentes estrategias de ventilación se denomina “Mixed-mode” (modo mixto) (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005) y debe considerarse desde varios enfoques: i) Previsión de contingencias: posibilidad de futuras adaptaciones del espacio, incorporando nuevas instalaciones para refrigeración adicional; ii) zonificación del modo mixto: algunos espacios pueden necesitar aire acondicionado y en otros se puede alcanzar el confort con ventilación natural; iii) cambio del modo según la estación del año; iv) sistemas simultáneos, de VN y VM, utilizándose uno u otro según la época del año.

Por último, otro aspecto básico de la filosofía de diseño de la VN es la relación entre el sistema y sus ocupantes. Debe permitirse a los usuarios interactuar con el sistema, pudiendo modificar por ejemplo la apertura de las ventanas, por lo que los controles automáticos deben ser considerados con precaución.

## 3.2 Estrategias de ventilación

Según la literatura especializada, existen tres tipos fundamentales de estrategias de ventilación, en función de la posición de las aberturas en la fachada (Chenari et al., 2016): i) ventilación a una cara (Fig.1.33); ii) ventilación cruzada (Fig.1.34.b.) y iii) ventilación por efecto chimenea (Fig.1.34.a). Estas están directamente relacionadas con la posición de las aberturas de ventilación. La ubicación de las aberturas es determinante en la efectividad de la VN y en el ambiente del edificio. Las aberturas de ventilación se ubican de manera intencionada para proporcionar suministro o extracción de aire a través del edificio. Son elementos clave de diseño a estudiar en detalle en los edificios ventilados naturalmente. Pueden ser de distintos tipos (Hazim B Awbi, 1998): i) ventanas practicables; ii) otras aberturas en la fachada (rejillas por ejemplo); iii) chimeneas.

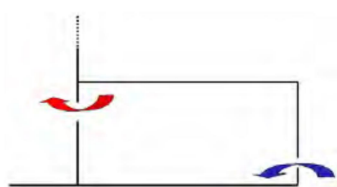
### 3.2.1 Clasificación



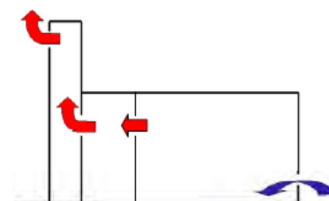
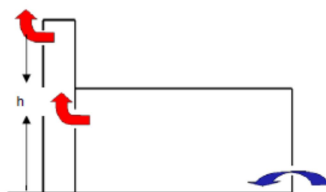
**Fig.1.33.** Admisiones de aire en ventilación a una cara. Fuente (Department for Education and skills, 2006)BB101 (Department for Education and skills, 2006)



**b. Ventilación cruzada**

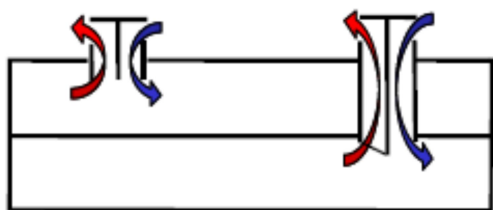


**a. Admisiones en efecto chimenea**



**Fig.1.34.** Ventilación cruzada (a) y ubicación de aberturas en efecto chimenea (b) en ventilación natural. Fuente BB101 (Department for Education and skills, 2006)

En el caso de diseño de sistemas de ventilación que utilizan el viento (Khan et al., 2008) hay técnicas que incluyen dispositivos captadores de viento como “turbine ventilators” y “windcatchers” (Fig.1.35) (Elmualim & Awbi, 2016; Jones & Kirby, 2009b; L. Li & Mak, 2007; Saadatian, Haw, Sopian, & Sulaiman, 2012; Su, Riffat, Lin, & Khan, 2008a).



**Fig.1.35.** Sistema de captación de viento con conductos a cubierta (“Split duct roof mounted ventilation”) (BB 101) (Department for Education and skills, 2006)

Los “Split duct roof mounted ventilation” (también conocidos como windcatchers) pueden clasificarse como otro tipo de estrategia de ventilación (Department for Education and skills, 2006). Estos dispositivos están ampliamente extendidos en Reino Unido. Basan su funcionamiento en las torres de viento, como las de la arquitectura vernácula de Irán (Bahadori, 1978; Ghaemmaghami & Mahmoudi, 2005; Mathur, 1994), y son aplicables a un determinado rango de climas, microclimas y tipo de edificios. Su desarrollo comercial para ventilación natural se ha estudiado por diversos investigadores. Richard et al. (Richard et al., 2012) se centraron en su desarrollo comercial, y Khan (Khan et al., 2008) comparó las técnicas antiguas con las modernas.



**Fig.1.36.** Windcatchers en cubierta. (“Monodraught: Engineering delivered. Naturally,” n.d.)

Como se mencionaba al inicio, la ubicación de las aberturas para la ventilación determina la efectividad de la VN y la renovación del aire. Así, está demostrado que la ventilación cruzada presenta mejor rendimiento que la ventilación a una cara. Omrani et al. (Omrani, Garcia-hansen, Capra, & Drogemuller, 2017) lo comprueban realizando mediciones

“in situ” a gran escala. Argiriou et al. [152] también lo investigan, comparando soluciones de ventilación a una cara y soluciones de ventilación cruzada. En su estudio, obtienen mejores resultados en el segundo caso que en el primero, alcanzándose las condiciones de confort en el 70% del tiempo con ventilación cruzada frente al 1% con ventilación a una cara.

Por otra parte, en cuanto a la posición relativa de las aperturas con respecto a la incidencia del viento sobre el edificio, según Xiao et al. (Xiao-Yu Maa, Yue Penga, Fu-Yun Zhaoa, \*, Cheng-Wei Liua, 2017), es mejor la ubicación de las aperturas a sotavento la orientación a barlovento, obteniéndose un mejor rendimiento en estos casos. Similares conclusiones obtuvieron Sacht y Azoia (Sacht & Azoia, 2017), a lo cual añaden que sólo puede usarse en edificios estrechos que no dispongan grandes obstáculos en la circulación del viento.

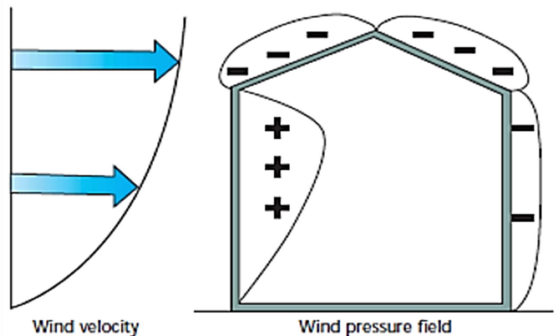


Fig.1.37. Presión del viento sobre el edificio: Reproducido de (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005)

Por otro lado, los ratios de ventilación en los SVN se pueden mejorar utilizando el efecto chimenea. Hellwig, et al. (Hellwig, Sedlmeier, & Tanzer, 2017) estudiaron esta capacidad de mejora en un edificio escolar en Alemania.

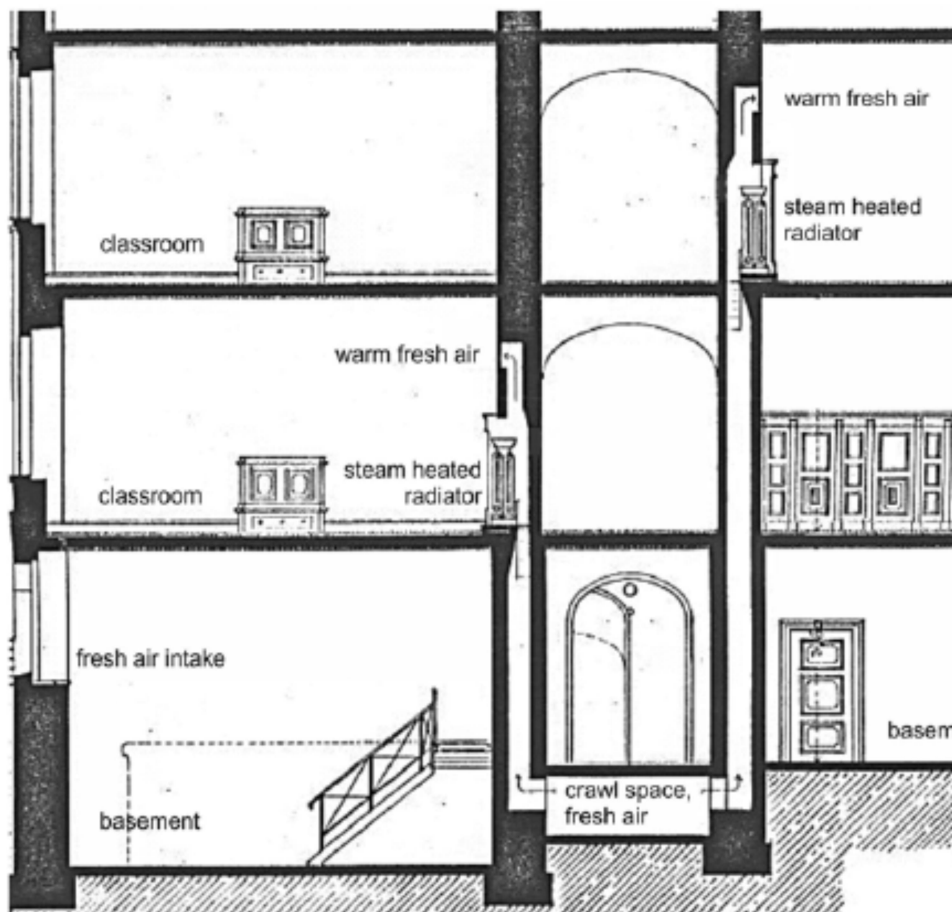


Fig.1.38. Suministro de aire por chimeneas en un edificio escolar en Alemania. Reproducido de (Hellwig et al., 2017)

Según Yusoff et al. (Yusoff, Salleh, Adam, Sopian, & Yusof Sulaiman, 2010) aún se puede mejorar el efecto chimenea en clima cálido utilizando una estrategia de ventilación solar inducida, para contrarrestar el reducido efecto chimenea que se produce al no haber suficiente salto térmico entre el interior y el exterior. La utilización del efecto chimenea en edificios de varias plantas es igualmente estudiado por Yang y Li (D. Yang & Li, 2015).

Se han planteado también otras estrategias de diseño en VN como el uso de patios interiores. Slah Driss et al. (Driss, Driss, Kammoun, & Kallel Kammoun, 2015). Estos estudiaron las características aerodinámicas de una vivienda con patio típica de Túnez. Como resultado obtuvieron la validación numérica del diseño mediante simulaciones en túnel de viento, observando la posible modificación del microclima alrededor del edificio y la mejora del flujo del aire.

A su vez, en un mismo edificio pueden confluír diferentes estrategias de ventilación natural, que pueden incorporarse al diseño de manera combinada. Un ejemplo de esto se muestra en la Fig.1.39.

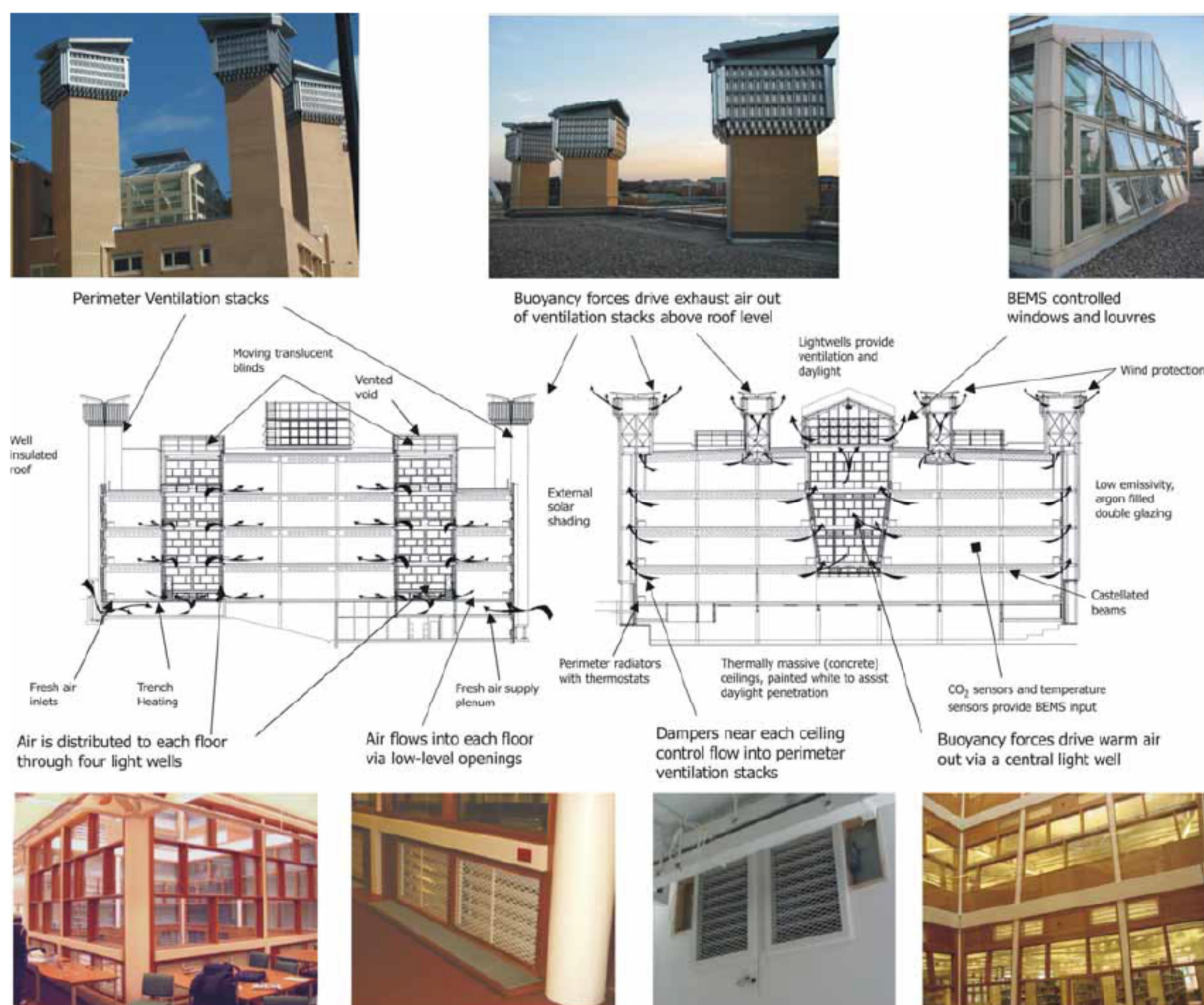


Fig.1.39. Ejemplo de estrategias de VN en un edificio. Reproducido de (Cook & Short, 2017)

### 3.2.2 Tamaño y tipo de ventanas

Las ventanas presentan una doble función en edificación, ya que proporcionan tanto iluminación como ventilación natural. Su posición y tamaño en relación al funcionamiento de la ventilación natural se expone en diversas publicaciones (Heiselberg, Bjørn, & Nielsen, 2017; Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005; J. Wang, Wang, Zhang, & Battaglia, 2017). Así mismo características tales como el tipo de ventana y su forma de apertura, si son fijas o practicables, su área de ventilación efectiva, la forma de su actuación (manual o automática), o si se presentan



elementos que ofrecen mayor resistencia al paso del aire, influyen directamente en las condiciones de ventilación natural.


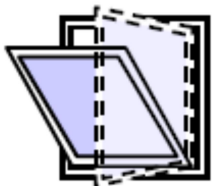






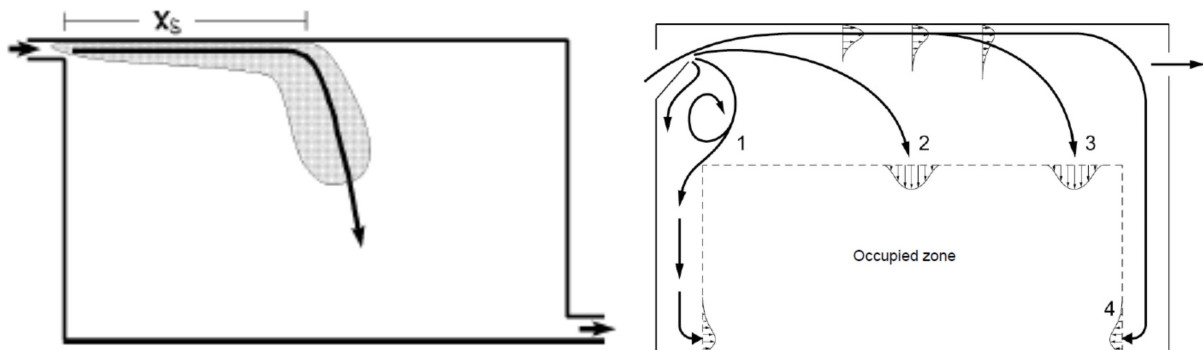
Window type	Airflow	Ventilation control	Weather protection	Night ventilation	Comments	
Horizontal sliding sash	Very good	Medium	Medium	Medium	No obstruction of internal blinds or external paths – can be draughty	
Tilt and turn	Good	Good	Good	Medium	Control is complex can reflect noise into classroom and turn function can be difficult with blinds – good at providing draught free winter ventilation	
Centre pivot	Very good	Medium	Good	Good	Can obstruct blinds and prevent glare control for VDU use and reflect noise into classroom	
Bottom hung inward opening fan light	Medium	Good	Good	Very good	May obstruct blinds. Can provide good control of external noise from ground level	
Top-hung outward opening	Good – but less so if restricted opening	Medium	Very good	Good	Can reflect noise from below into the room. Can pose a hazard if opening over a pathway or playground	
Side-hung casement	Good	Medium	Medium	Poor	Poor security when open and rain can enter. Can pose a hazard if opening over a path or playground	
Upper fanlight and outward opening casement	Good	Very good	Very good	Very good	Good all round performance. Can pose a hazard if opening over a path or playground – possible rain ingress	
Vertical double sash	Very good	Good	Medium	Medium	No obstruction of internal blinds or external paths.	

Fig.1.40. Distintos tipos de ventana y su consideración para los SVN. Reproducido de (Department for Education and skills, 2006)

Satch y Azoia (Sacht & Azoia, 2017) analizan dos dimensiones diferentes de ventana en relación a la superficie del espacio ventilado (10% y 25%), observando variaciones en las condiciones de ventilación, los coeficientes de presión promedio y las tasas de renovación. Heiselberg et al. (Heiselberg et al., 2017) analizan el efecto del tipo de ventana y su ubicación en la fachada, mostrando que una combinación de diversos tipos de ventana y ubicaciones proporciona un adecuado confort térmico minimizando las corrientes de aire. Como resultado principal obtuvieron que con ventanas altas, ubicadas cerca del techo en condiciones de flujo isotérmico (con pequeñas diferencias de temperatura), el riesgo de corriente de aire era muy pequeño en la zona ocupada. Además, presentaban este trabajo desde el enfoque de la refrigeración pasiva. Wang et al comprueban también cómo la ubicación de la ventana es determinante en relación a la tasa de ventilación y la temperatura alcanzada dentro del edificio, aun teniendo la misma superficie de apertura (J. Wang et al., 2017).



**Fig.1.41.** Penetración y distribución de la entrada de aire por ventanas altas. Izda.) reproducido de (Heiselberg et al., 2017); dcha.) reproducido de (Heiselberg, 2017)

Athanassios et al analizan el impacto de los dispositivos de sombreado en las grandes aberturas durante la utilización de la estrategia de ventilación a una cara (Argiriou, Balaras, & Lykoudis, 2002), proponiendo ecuaciones de cálculo para tener este efecto en consideración en los modelos de las simulaciones térmicas de los edificios en cuanto a su carácter de refrigeración pasiva. Con el enfoque de la refrigeración, Aflaki et al. (Aflaki, Mahyuddin, Al-Cheikh Mahmoud, & Baharum, 2015) estudian las estrategias de ventilación y su aplicabilidad a climas tropicales, para hacerlos menos dependientes de los sistemas electromecánicos y conseguir así el confort reduciendo el consumo. En las conclusiones señalan la importancia de tener en cuenta en el diseño los aspectos relacionados con la relación ventana-pared, las chimeneas de ventilación y la orientación del edificio.

El dimensionamiento óptimo de la ventana también ha sido objeto de investigación de proyectos como URBVENT (UNIVERSITE DE LA ROCHELLE et al., n.d.). En éste se desarrolla el análisis de la VN en zonas urbanas, evaluando su potencial y estudiando el diseño óptimo de la fachada. Los supuestos principales, los criterios de diseño y los modelos se explican en el Informe 1 (Germano et al., 2004) y las conclusiones principales se incluyen en el Informe final (Ghiaus et al., 2003). Este trabajo de investigación incluye también un programa informático específico para cálculo y dimensionamiento.

### 3.2.3 El papel del clima y el viento en la ventilación natural

La efectividad de la VN está determinada tanto por las condiciones climáticas exteriores (microclima) tales como la velocidad del viento, la temperatura, la humedad y la topografía, como por el edificio mismo en cuanto a su orientación, número de ventanas o aperturas, tamaño y localización (H. B. Awbi, 2008).

Cheng Y. et al. investigan el potencial de la ventilación natural a nivel mundial, teniendo en cuenta las distintas variaciones regionales y climáticas (Y. Chen et al., 2017). Analizan un factor que denominan “hora NV”, calibrándolo mediante simulaciones energéticas. La “hora NV” se emplea como un indicador para medir los máximos potenciales de ventilación natural para cada ubicación. Se define como la cantidad de horas en un año típico (de 8760 h) cuando las condiciones climáticas al aire libre (por ejemplo, la velocidad del viento, la temperatura, la humedad) son adecuadas para utilizar la ventilación natural. Dado que la “hora NV” se deriva de datos meteorológicos exteriores solamente, mide el número máximo de horas cuando el clima exterior es favorable para la ventilación natural. La ventilación mecánica puede tener lugar durante las “horas de NV” si la ventilación natural sola no puede alcanzar un

confort térmico satisfactorio debido a la alta carga interna del edificio. Además, no utilizan un umbral de temperatura fijo durante todo el año, sino que utilizan el modelo de confort adaptativo de Dear y Brager, que se basa en la idea de que el clima exterior afecta al confort interior porque los seres humanos pueden adaptarse a varias temperaturas en diferentes momentos del año.

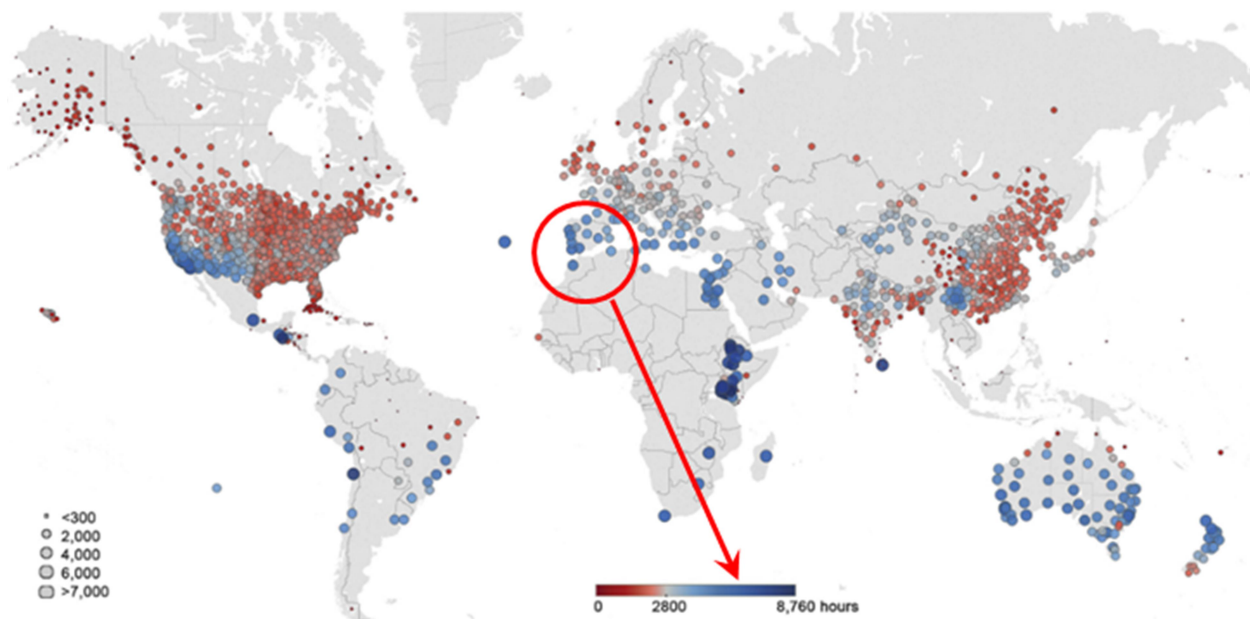


Fig.1.42. Mapa geográfico del nº de horas NV en 1854 localizaciones. Reproducido de (Y. Chen et al., 2017)

De su análisis de múltiples localizaciones y diferentes climas obtienen como resultado que de esta "hora de VN" se pueden extraer conclusiones sin necesidad de una simulación detallada. Utilizan el sistema de Köppen-Geiger para describir las variaciones climáticas y para las simulaciones emplean el esquema de clasificación de clima estadístico introducido por Briggs et al. en la ASHRAE 169-2006. Según esta evaluación (Fig.1.42), la península ibérica presenta un índice de horas NV muy elevado, lo cual determina que en climas como el Mediterráneo el potencial de VN es muy amplio. Por el contrario, es muy bajo en climas tropicales con ambiente cálido y húmedo durante todo el año.

En cuanto al efecto del viento también se ha analizado por autores como Cheng J et al. (Cheng et al., 2018), los cuales evalúan el potencial de ventilación natural por acción del viento utilizando simulaciones en CFD (dinámica de fluidos computacional por sus siglas en inglés). Con este estudio buscan determinar los coeficientes de ventilación críticos para definir un método de evaluación sencillo, que pueda emplearse en los primeros estadios de diseño. También elaboran mapas de potencial de ventilación natural, pero a diferencia del caso anterior, sólo en Norteamérica y sólo con el enfoque del viento. Entre sus conclusiones señalan que la ventilación natural también se puede utilizar para ahorrar energía durante la temporada de transición y el invierno, especialmente en edificios con altas ganancias de calor interno.

Carrilho da Graça y Linden (Carrilho & Linden, 2016) analizan cómo el efecto chimenea ("stack") es más débil que el viento (una diferencia de temperatura de 8°C con una diferencia de altura de 3 m genera una presión de flujo de 1 Pa, un valor que se supera con una velocidad del viento de 2 m/s), pero es más fiable debido a su capacidad de autoajuste, ya que las cargas internas de calor sensible conducen el flujo de ventilación de manera proporcional, incrementándola con cada aumento de carga. Por el contrario, el viento es más fuerte pero sufre fluctuaciones en la intensidad. Dado que todas las localizaciones tendrán algún período con presión de viento casi nula, ellos recomiendan que los sistemas de VN se diseñen para el "peor caso" de operación solo con efecto chimenea. Por otro lado, Gajewski y Gładyszewska-Fiedoruk (Gładyszewska-Fiedoruk & Gajewski, 2012) también estudian el efecto del viento en soluciones de ventilación con chimeneas en Europa central. En su investigación, comprueban cómo el viento tiene una influencia considerable en la velocidad del aire en el sistema de ventilación de la chimenea, demostrando que esta tasa podría cambiar hasta un 350%.

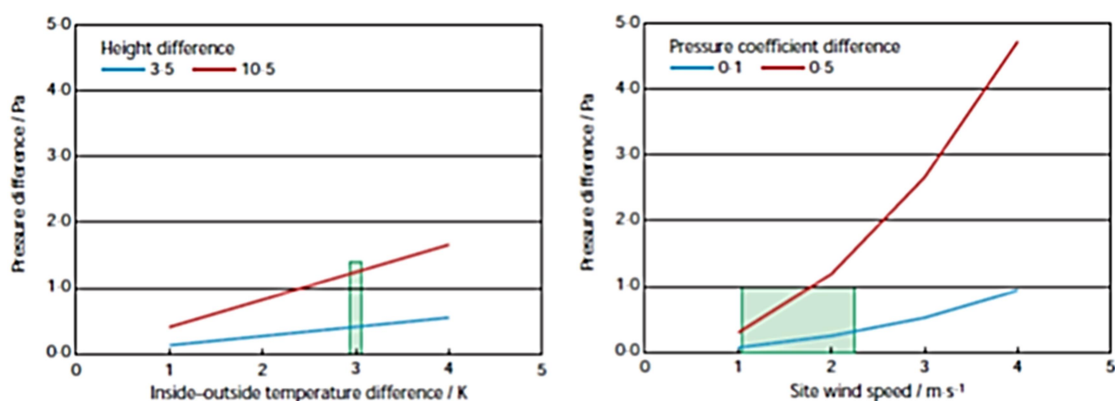


Fig.1.43. Diferencia de presiones debidas al efecto chimenea y al efecto del viento. Izda.) sólo efecto chimenea; dcha.) sólo viento. Reproducido de (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005)

### 3.3 Los SVN como medio de ahorro de energía

La demanda de energía ha aumentado en todo el mundo y el sector de la construcción representa un gran porcentaje del consumo mundial, por lo que promover la eficiencia energética en los edificios es esencial. Entre todas las instalaciones que se suelen incluir en los edificios, los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) se identifican como los mayores consumidores de energía, siendo la ventilación en los sistemas HVAC, el factor clave para proporcionar una CAI (apartados 1 y 2). Por lo tanto, mejorar los sistemas de ventilación desempeña un papel fundamental no solo en mejorar la eficiencia energética en los edificios, sino también en proporcionar un mejor clima interior para los ocupantes y, en consecuencia, reducir la posibilidad de problemas de salud (Chenari et al. (Chenari et al., 2016)).

Los SVN funcionan sin consumo de energía eléctrica (Oropeza-Perez & Ostergaard, 2014) o con un consumo mínimo, como en el caso de que las admisiones de aire estén automatizadas, por lo que con su utilización se puede reducir la huella de carbono de los edificios y disminuir la demanda de energía de combustibles fósiles. La comparación en el análisis del ciclo de vida y los consumos y emisiones de diferentes tipos de sistemas de ventilación se representan en la Fig.1.22, mostrándose el mejor desempeño de los SVN.

Numerosos estudios identifican la VN como una tecnología limpia, sostenible y eficiente desde el punto de vista energético (Chenari et al., 2016; Heiselberg, 2017). Fordham afirma también que los edificios deben ser diseñados con la ventilación natural en mente para reducir el consumo de energía fósil (Fordham, 2000). De este modo, de entre los distintos tipos de sistemas de ventilación que pueden diseñarse en edificación, la ventilación natural se constituye en la opción con mayor índice de impacto para mejorar la sostenibilidad en los edificios, reduciendo los consumos y mejorando el ambiente interior (Y. Chen et al., 2017).

Estos sistemas pueden utilizarse tanto para alcanzar los estándares de CAI como de confort térmico, siendo este efecto mayor en climas templados con temperaturas moderadas (Fordham, 2000).

Como elemento de control de la CAI, estos sistemas proporcionan un ambiente interior cómodo y saludable (Oropeza-perez et al., 2014). De acuerdo con esto Sassi (Sassi, 2013), compara dos viviendas en Cardiff diseñadas con el estándar Passivhaus, pero funcionando una de ellas con VN y la otra con VM. Como resultados, obtuvo consumos de 36 kWh de energía primaria/m<sup>2</sup> año en el primer caso y de 93 kWh de energía primaria/m<sup>2</sup> año para el segundo caso, concluyendo que en este tipo de clima, la solución de ventilación natural consume menos y tiene además menor gasto de inversión inicial, garantizándose las condiciones de confort interiores.

Como estrategia de mejora del confort térmico, el Anex 62 de la Agencia Internacional de Energía (IEA) (IEA-EBC, n.d.), desarrolló el concepto de utilización de la ventilación natural como estrategia de refrigeración pasiva en el programa "Energy in Buildings and Communities Programme" (International Energy Agency's Energy in Buildings and Communities & IEA-EBC, n.d.). Esta estrategia se denomina "Ventilative Cooling" ("enfriamiento por ventilación") y se lanzó en 2012 a través de la plataforma internacional "Venticool" (Venticool, 2018). Las últimas conclusiones

se han publicado en 2018 (Energy in Buildings and Communities Programme, 2018). Se proporciona también una herramienta de cálculo para evaluar el potencial de la utilización de la ventilación para refrigeración. En la Fig.3.17 se observa cómo para ejemplos estudiados en localizaciones de ámbito mediterráneo, el potencial de utilización está en el entorno del 80%. Ambos casos se estudiaron utilizando estrategias de VN.

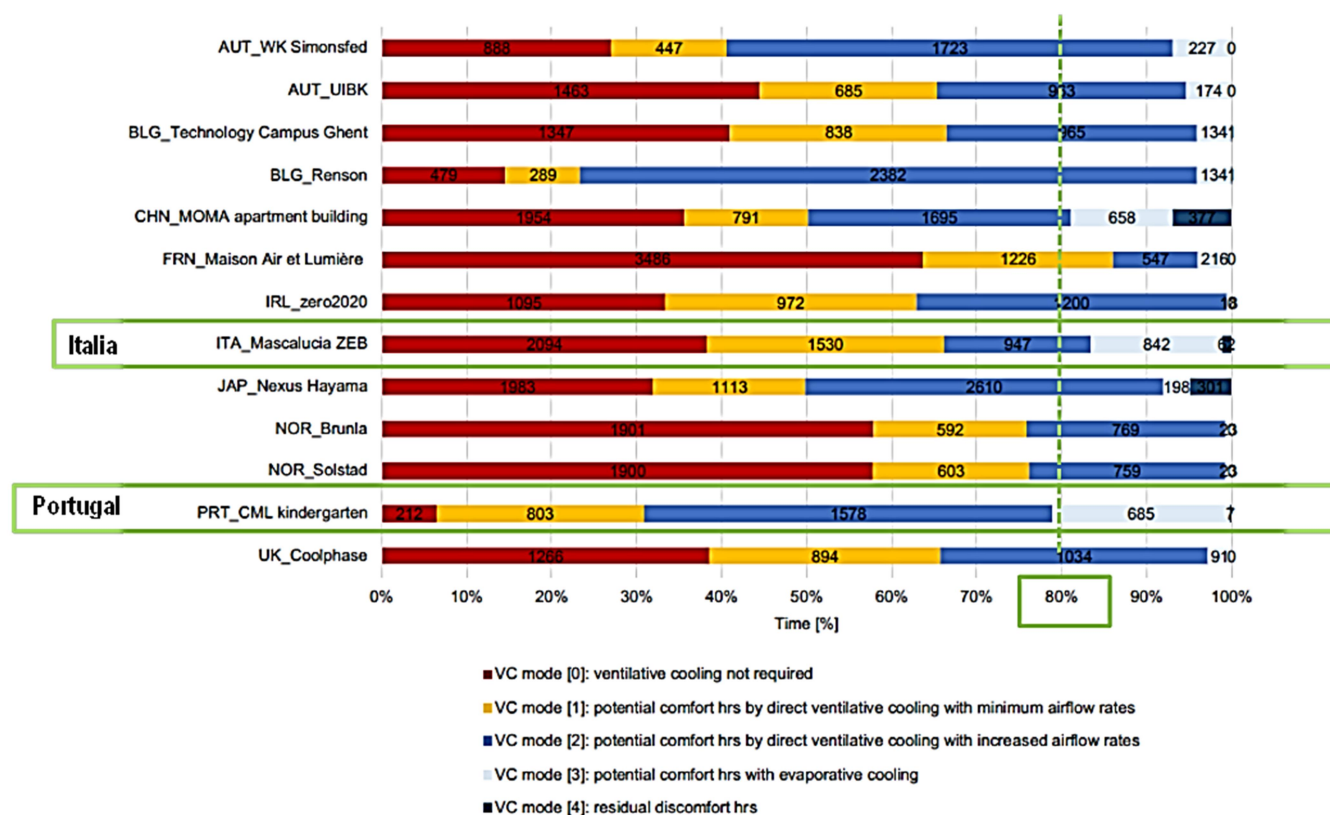


Fig.1.44. Potencial de utilización de la estrategia “ventilative cooling” en distintas localizaciones. Reproducido de (*Ventilative Cooling Design Guide Energy in Buildings and Communities Programme, 2018*)

Según Flourentzou (Flourentzou et al., 2017), la VN es la única estrategia pasiva de refrigeración sin consumo de electricidad (Cook & Short, 2017) con un potencial de ahorro significativo en los sistemas de refrigeración y en el consumo eléctrico de los ventiladores. Oropeza et al. (Oropeza-perez et al., 2014; Oropeza-Perez & Ostergaard, 2014; Oropeza-Perez & Østergaard, 2014) muestran también las posibilidades de la ventilación natural como método pasivo de refrigeración en clima cálido. Otros autores como Ghjuvan Antone Faggianelli et al. (Faggianelli et al., 2014) investigaron el uso de las brisas caracterizadas por velocidades moderadas y una dirección bien definida, para mejorar la técnica de ventilación cruzada natural en las zonas costeras mediterráneas.

La utilización de SVN permite además de un menor gasto de energía, construir edificios con menores costes de inversión, funcionamiento y mantenimiento (Congreso, Energ, & Nula, 2017; Gil-Báez, Barrios-Padura, Molina-Huelva, & Roldán-Vendrell, 2017), alcanzando en mayor medida los objetivos de las directivas europeas en cuanto a una mejor relación coste eficacia de los edificios. Sin embargo, tal como exponen autores como Ulrike y Battaglia (Passe & Battaglia, 2015) o Schulze y Eicker [37], estos sistemas aún no se aplican ampliamente debido a la falta de información sobre las cuestiones de diseño y su efecto en relación al confort térmico y la CAI.

### 3.4 La ventilación en la normativa actual

Según Persily (Persily, 2015), la ventilación en los edificios tiene un importante papel en la salud, comodidad y productividad de sus ocupantes. Así, algunas de las primeras recomendaciones sobre índices de ventilación de edificios fueron publicadas ya en el siglo XIX (Pettenkofer). Estas recomendaciones se transformaron posteriormente en estándares más rigurosos en el siglo XX, con la primera versión de ASHRAE Standard 62 (ASHRAE Standing Standard Project Committee 55, 2011) publicada en 1973. Desde entonces, se han publicado



estándares de ventilación en diversos países. Estos se han enfrentado a un conjunto cada vez más complejo de temas, a medida que la investigación sobre la calidad del aire interior y el estado del conocimiento sobre el rendimiento de los edificios ha ido evolucionando.

La ventilación mecánica es fácil de calcular, mientras que la ventilación natural requiere de sistemas que en algunos casos suponen imprecisión o no se valoran por desconocimiento (Allard et al., 1998; H. B. Awbi, 2008; Passe & Battaglia, 2015; M. (Matheos) Santamouris & Wouters, 2006). En cualquier caso, son sistemas que encuadran perfectamente con los objetivos de las Directivas Europeas de eficiencia energética en los edificios en cuanto a consideración del clima de la zona y evaluación y equilibrio coste-eficacia (Comisión Europea, 2010, 2018; DOCE Diario Oficial de la Unión Europea, 2012).

### 3.4.1 Investigación y desarrollo de los SVN

Actualmente, el diseño de los sistemas de ventilación natural está ampliamente analizado y desarrollado en numerosas publicaciones científicas. La incorporación de los SVN en edificación es objeto de estudio en muy diferentes localizaciones. Cheng Y. et al. (Y. Chen et al., 2017), realizan un análisis y clasificación de distintos estudios en materia de ventilación natural según su localización y método de análisis utilizado, mostrando publicaciones en China, India, Tailandia, Singapur, países del este, Sudáfrica, Argelia, Reino Unido, Alemania, Dinamarca, Suecia, Italia, Grecia, EEUU, México, Brasil y Australia (Fig.1.45).

**Table 1**  
Summary of past studies on natural ventilation sorted by method and location.

Author and Year	Location	Method	Ref.
Yang et al. (2005)	China	Simulation	[36]
Luo et al. (2007)	China	Simulation	[50]
Yao et al. (2009)	China	Simulation	[37]
Yin et al. (2010)	China	Simulation	[51]
Tong et al. (2016)	China	Simulation	[6]
Indraganti (2010)	India	Survey & experiment	[52]
Tantasavasdi et al. (2001)	Thailand	Simulation	[38]
Liping et al. (2007)	Singapore	Data analysis	[53]
Kubota (2009)	Malaysia	Survey & Experiment	[54]
Bahadori et al. (1994)	Middle East	N/A Review	[40]
Ayata et al. (2006, 2007)	Middle East	Simulation	[55,63]
Calautit et al. (2013)	Middle East	Simulation	[39]
Mathews (1986)	South Africa	Simulation & Experiment	[56]
Bouchahm (2011)	Algeria	Simulation & Experiment	[41]
Artmann et al. (2007)	Europe	Data analysis	[42]
Kolokotroni and Aronis (1999)	U.K.	Simulation	[57]
Pasquay (2004)	Germany	Experiment	[58]
van Hooff and Blocken (2010)	Netherlands	Simulation & Experiment	[44,45]
Oropeza-Pereza and Østergaardb (2014)	Denmark	Simulation	[43]
Germano (2007)	Switzerland	Data analysis	[59]
Ballestinia et al. (2005)	Italy	Simulation	[60]
Santamouris et al. (2008, 2010)	Greece	Experiment & Simulation	[61,62]
Hiyama and Glicksman (2015)	U.S.	Simulation	[46]
Dutton et al. (2013)	U.S.	Experiment	[64]
Malkawi et al. (2016)	U.S.	Simulation	[13]
Tong et al. (2017)	U.S.	Simulation	[47]
Oropeza-Pereza and Østergaardb (2014)	Mexico	Simulation	[65]
Cândido et al. (2011)	Brazil	Experiment & Survey	[48]
Deuble and de Dear (2012)	Australia	Experiment & Survey	[49]

**Fig.1.45.** Estudios sobre ventilación natural. Reproducido de (Y. Chen et al., 2017)

Sin embargo, a nivel local no se han encontrado publicaciones relacionadas con los SVN en edificación, más allá de estudios de investigación en el campo de la ingeniería para el diseño y dimensionamiento de dispositivos específicos, como el de Sánchez et al. (Sánchez et al., 2012). En diciembre de 2018 se localizaron más de 2500 registros en Scopus ("www.scopus.com," n.d.) con la palabra clave "natural ventilation".

En la Fig.1.46 se representa la tendencia de la Ventilación Natural como tema de investigación, en términos de distribución en las áreas de I+D, producción científica por años, por fuentes y por institución de investigación. Se puede apreciar la alta actividad de I+D en ventilación natural, con un número creciente de publicaciones por año, de 172 en 2010 a 276 en 2017, y con una concentración de actividad de I+D en las áreas de ingeniería y edificios, siendo de interés la distribución regional. Se observa una investigación muy activa en VN en dos regiones muy diferentes, como China y el Reino Unido, que muestran el interés global del tema

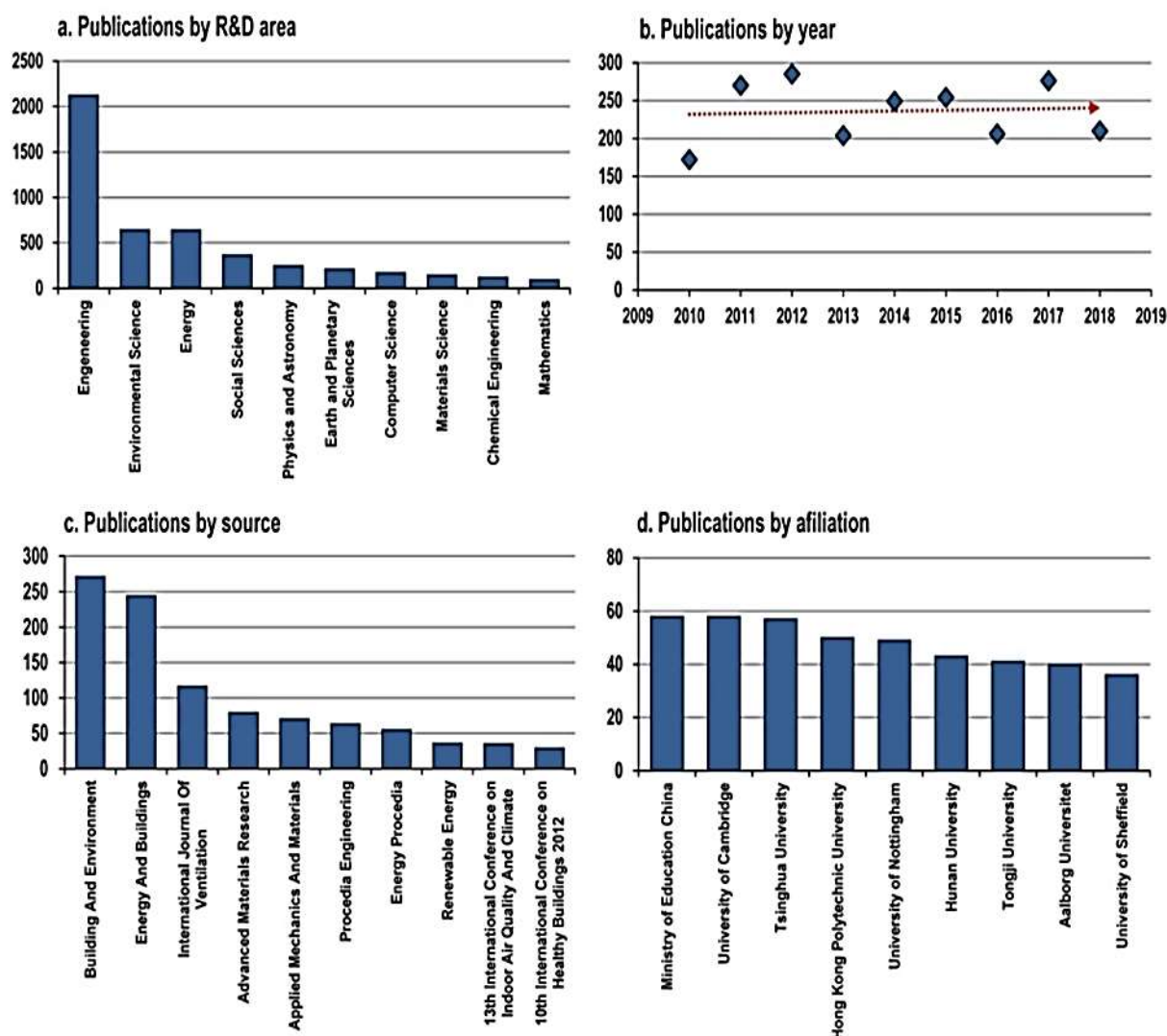


Fig.1.46. N° de publicaciones con la palabra clave “natural ventilation” en la base de datos Scopus (acceso en diciembre de 2018) (“www.scopus.com,” n.d.): por área de conocimiento (a), año (b), fuente (c) y afiliación (d) (fuente: elaboración propia)

### 3.4.2 Regulación internacional

La reglamentación técnica internacional desarrolla normativamente el diseño e integración de los sistemas de ventilación natural en los edificios. Donde más información e implantación comercial y tecnológica se ha encontrado ha sido en el Reino Unido. El organismo CIBSE (Chartered Institution of Building Services) (“CIBSE - Chartered Institution of Building Services Engineers,” n.d.) muestra una intensa labor de investigación y difusión específica en este campo (“CIBSE - Natural Ventilation Group,” n.d.). Su manual AM10 (Chartered Institution of Building Services Engineers., 2014) junto con la herramienta de cálculo asociada, constituye una herramienta muy útil y práctica para el diseño de los sistemas VN en los edificios de uso no residencial. También en Reino Unido en la Universidad de Nottingham existe un grupo de investigación, con numerosas publicaciones relacionadas con la VN (Su, Riffat, Lin, & Khan, 2008b) en el que Etheridge ha desarrollado otra herramienta de simulación denominada “Naturalcooling-Optivent” (“Naturalcooling- Optivent,” n.d.). Otras Universidades han desarrollado sus propios estudios, como la de Brunel para el diseño y desarrollo de los windcatchers (Jones & Kirby, 2009a; Jones, Kirby, Jones, & Kirby, 2016), la Universidad de Reading (Elmualim & Awbi, 2016), o la Universidad de Sheffield (Connor et al., 2016; Hughes & Abdul Ghani, 2009).

Cabe señalar también el trabajo desarrollado en EEUU en el MIT por Glicksman (Allocca, Chen, & Glicksman, 2003; Hiyama & Glicksman, 2015; Tan & Glicksman, 2005), el cual ha desarrollado una herramienta de simulación llamada CoolVent (MIT, n.d.). En el caso específico de EEUU, la ventilación natural asociada a la reducción del consumo

debido a los sistemas de refrigeración es un tema de gran interés. Su tradición constructiva ha ido encaminada, sobre todo a partir de la segunda mitad del siglo XX, a un uso intensivo de estos sistemas, cuestión que a día de hoy está comenzando a tener un replanteamiento, al menos desde algunos ámbitos. En el “webinar” Advanced Natural and Mixed Mode Ventilation Design, del 26 de septiembre de 2017, disponible en la web la empresa Windowmaster (“Windowmaster,” n.d.), se muestran resultados del proyecto “California Zero-Net-Energy (ZNE)”, con casos de estudio desarrollados con este objetivo.

A nivel académico, Fuentes y Rodríguez (Fuentes Freixanet & Rodríguez Viqueira, n.d.) firman en Méjico un texto a modo de manual de arquitectura para el diseño de la ventilación natural, donde se incluyen los principios básicos, para ser empleados en edificios diseñados con principios bioclimáticos. En Argentina, Yarke et al. tienen también publicaciones en este campo (E.Yarke, M.Fujol, L.Vitali, 2004).

La publicación “Natural ventilation in buildings: a design handbook” (Allard et al., 1998) del año 1998, vinculado al proyecto de investigación AIOLOS del programa europeo ALTENER, se presenta como un libro de recomendaciones para el diseño de sistemas de ventilación natural en los edificios, en el que se desarrolla un software de cálculo para usar en los estadios primeros de diseño. Este es anterior al desarrollo específico de las simulaciones CFD específicas para edificación. Recientemente Passe y Battaglia (Passe & Battaglia, 2015) han elaborado también una guía para arquitectos para el diseño de edificios con VN.

En general, la VN es considerada como una solución más de las diferentes opciones con las que cuenta el proyectista a la hora de enfrentarse a la definición de las instalaciones y dispositivos que incluirá en el diseño del edificio. En realidad, esta es una cuestión que debe valorarse y decidirse conjuntamente con el propietario del edificio, debido a la importante repercusión económica, entre otras cuestiones, que tiene la elección de un tipo de sistema u otro a lo largo de la vida útil del edificio y que está directamente relacionada con la forma de uso y funcionamiento del mismo.

### 3.4.3 Normativa nacional

En España, la Ley 38/1999 de Ordenación de la edificación (LOE) (Jefatura del Estado, 2012), definía en su artículo 3 los requisitos básicos que debían cumplir los edificios para garantizar la seguridad de las personas, el bienestar de la sociedad, la sostenibilidad de la edificación y la protección del medio ambiente. Autorizaba al Gobierno, en su disposición final segunda, para la aprobación en el plazo de 2 años de un Código Técnico de la Edificación que estableciera los requisitos a cumplir por los edificios en relación con los requisitos básicos. Este CTE no se publica hasta el año 2006 (Ministerio de vivienda, 2006), con la finalidad de, según indica en su exposición de motivos, servir de instrumento normativo que fija las exigencias básicas de calidad de los edificios y sus instalaciones y con el objetivo de promover la innovación y la sostenibilidad en cumplimiento de la LOE, así como para dar cumplimiento a la DE 2002/91 (Europeo et al., 2003), en virtud de la cual se incorporan las exigencias relativas a la eficiencia energética de los edificios.

El CTE está estructurado en dos partes. La primera de ellas está constituida por el articulado que determina las disposiciones de carácter general así como las exigencias que deben cumplir los edificios para satisfacer los requisitos de seguridad y salubridad. La segunda parte se compone de los Documentos Básicos con procedimientos, reglas técnicas y ejemplos de soluciones que permiten determinar si el edificio cumple con las prestaciones, sin tener carácter excluyente. Uno de los aspectos novedosos del CTE, que siguieron otras normativas posteriores, es tener un enfoque “basado en prestaciones” en línea con el adoptado en el ámbito de la Unión Europea por la Resolución del Consejo, de 5 de mayo de 1985. Con este enfoque se pretende, por parte de la normativa, promover la investigación y no dificultar el progreso tecnológico, suponiendo frente a los tradicionales códigos prescriptivos, una mayor apertura a la innovación. Así, estas normas facilitan en diversos documentos e instrucciones técnicas soluciones tipificadas para cumplir con las exigencias técnicas a las que deben dar cumplimiento los edificios, pero a su vez posibilitan la utilización de soluciones alternativas que lleven a la obtención del cumplimiento de estas exigencias y que al no estar reguladas normativamente, deberán desarrollarse en cada caso.



Por otro lado, el CTE, promueve en su Documento Básico de Ahorro de Energía (DB HE), el incremento de la hermeticidad con el objeto de reducir las pérdidas de energía de acondicionamiento térmico. Paralelamente, tal como se ha visto en apartados anteriores, debió regularse el aspecto de la salubridad en los espacios interiores, ya que al incrementarse la hermeticidad, se perdía la posibilidad del edificio de “autoventilarse” mediante las infiltraciones, por lo que se veía expuesto a un empeoramiento de la CAI. Debido a esto, se desarrolla el DB HS para controlar la salubridad (ya hemos visto que en Reino Unido fue “Build Tight Ventilate Right”). Con esto daba respuesta a la exigencia de la LOE de garantizar el requisito de salubridad.

El DB HS identifica expresamente en su ámbito de aplicación el uso residencial, remitiendo para el resto de usos al RITE (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013), de modo que, en edificios de uso no residencial, la salubridad estará garantizada si se sigue lo que indica el RITE en estos otros usos. A su vez, El RITE establece en su articulado una serie de requisitos técnicos que deben cumplir las Instalaciones Térmicas en los Edificios. Además incorpora unas Instrucciones Técnicas, las cuales, si se cumplen, se supone que garantizan el cumplimiento de los mismos. En línea con lo recogido en el libro de Santamouris (M. Santamouris, 2007), según el cual la filosofía subyacente en los estándares internacionales promueve espacios refrigerados mecánicamente, el RITE en su versión 2007 es un claro ejemplo de ello, en relación a la ventilación de los mismos. Así, las IT reproducen parcialmente la UNE EN 13779, que se refiere exclusivamente a espacios ventilados mecánicamente, asociando de manera indirecta el uso (no residencial) con el sistema (UTAs). Sin embargo, como ya se ha mostrado, numerosas publicaciones y estudios científicos a nivel internacional, analizan, estudian y desarrollan el amplio abanico de soluciones existentes para resolver la ventilación de los edificios, siendo lo reflejado en la normativa española actual sólo una parte de las mismas. De hecho, el RITE en su versión de 1998 (Ministerio de Economía y Hacienda, Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, & Ministerio de Economía y Hacienda, 1998), consideraba los edificios ventilados naturalmente, así como las posibles infiltraciones en los cálculos térmicos. Sin embargo, en las Instrucciones Técnicas de 2007, a diferencia de la versión del '98, no se menciona ni se recoge la ventilación natural, quedando, eso sí, regulado en el artículo 14.2.b) del propio reglamento, la posibilidad de dar cumplimiento a las exigencias técnicas mediante otros sistemas alternativos, diferentes a los descritos en las Instrucciones Técnicas, que garanticen el cumplimiento de las exigencias reguladas en el articulado y que pueden separarse parcial o totalmente de estas.

Por último, ha de tenerse en cuenta también que el RITE es el Reglamento que regula las Instalaciones Térmicas, de aplicación cuando estas existen, pero no en el caso de los edificios en oscilación libre sin máquinas, existiendo de algún modo un aspecto que no está regulado normativamente. Por otro lado, cabe señalar también que el RITE y el CTE se encuentran, según el orden de prelación de la leyes, en un rango inferior al de la LOE, al ser estos reglamento y la otra una Ley.

En resumen, en la normativa española no se han encontrado referencias al diseño de SVN asociados al uso no residencial, y en el caso de la ventilación no mecánica en uso residencial no hay desarrollada una reglamentación técnica de cálculo y diseño que permita la utilización de las estrategias anteriormente mencionadas. Tampoco se tienen en cuenta estas estrategias en las herramientas de certificación, ni se da la opción de realizar una simulación directamente considerando este aspecto de diseño. Igualmente no se han localizado materias de este tipo en los planes de estudio de las carreras técnicas relacionadas con el diseño de los edificios. Sólo se han localizado 5 libros o manuales relacionadas con el tema en las bibliotecas de las Escuelas de Ingeniería y Arquitectura de Sevilla (Allard et al., 1998; H. B. Awbi, 2008; Chartered Institution of Building Services Engineers., 2014; Passe & Battaglia, 2015; M. (Matheos) Santamouris & Wouters, 2006; M. Santamouris, 2007).

### 3.5 Herramientas de cálculo y simulación

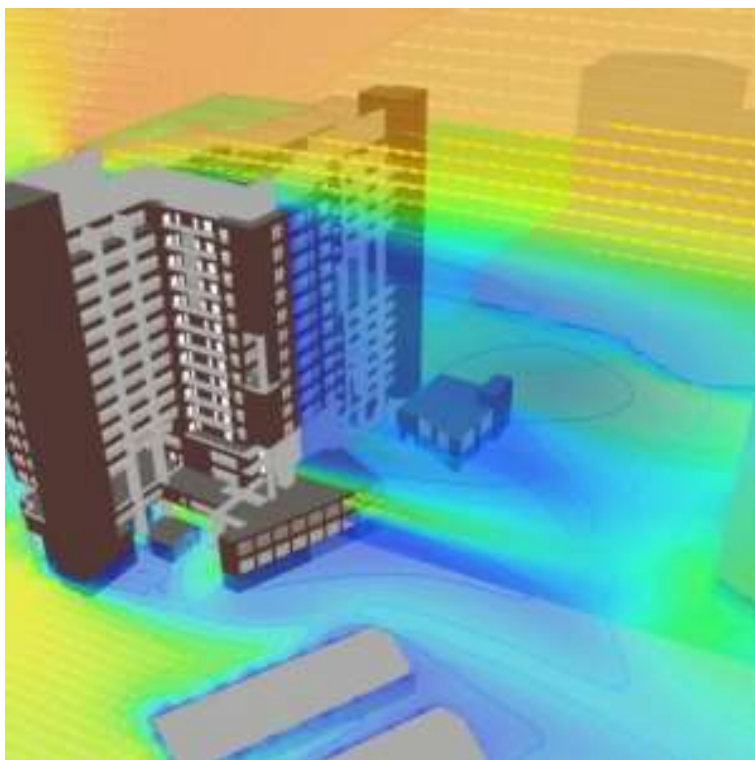
Para diseñar un SVN es fundamental conocer cómo se mueve el aire alrededor del edificio y a través de él o en el espacio interior y cómo afecta el funcionamiento de estos sistemas en el comportamiento termodinámico de los edificios y en sus consumos finales de energía. Algunas herramientas de diseño y cálculo y aplicaciones específicas que pueden emplearse para evaluar el diseño de la VN se recogen en la Tabla 1.4.

**Tabla 1.4.** Distintas aplicaciones para el diseño y cálculo de la VN en edificios. (fuente: elaboración propia)

<b>Aplicaciones específicas de ventilación natural</b>	
<b>Herramienta</b>	<b>Descripción</b>
Contam (NIST, n.d.-a)	Es una herramienta desarrollada por el NIST (National Institute of Standards and Technology) del gobierno de los EEUU. Es un programa informático multizona de análisis de ventilación y calidad del aire interior diseñado para ayudarlo a determinar flujos de aire, concentraciones de contaminantes, predicción de exposición de los contaminantes
Loopda (NIST, n.d.-b)	Es una herramienta de ventilación natural también desarrollada por el NIST. La actual versión es la 3.0 siendo la primera desarrollada en 2003. Hay numerosos artículos de investigación relacionados con el desarrollo e implementación de la misma.
MIT- Coolvent (MIT, n.d.) Naturalcooling-Optivent ("Naturalcooling-Optivent," n.d.)	Herramienta de diseño desarrollada por el MIT (EEUU)
AM 10- Natural Ventilation in non-domestic buildings tool (CIBSE, n.d.)	Herramienta de diseño desarrollada por CIBSE (UK)
<b>Programas de cálculo termodinámico</b>	
Trnsys ("Fluent-Ansys," n.d.)	Es un programa de cálculo generalista para cálculo de sistemas transitorios. La gran mayoría de las simulaciones se centran en evaluar el rendimiento de los sistemas de energía térmica y eléctrica.
Energyplus ("EnergyPlus EnergyPlus," n.d.)	Es un programa completo de simulación de energía de edificios que los ingenieros, arquitectos e investigadores utilizan para modelar tanto el consumo de energía para calefacción, refrigeración, ventilación, iluminación y procesos, como el uso de agua en los edificios. Desarrollado por departamento de energía de Estados Unidos US DOE. Hay quien lo considera como el programa de simulación térmica de los edificios más avanzado que existe.
Ansys Fluent ("Fluent-Ansys," n.d.)	Para aplicaciones industriales simulación CFD
Designbuilder ("DesignBuilder Software Ltd - Home," n.d.)	Para edificación. CFD para edificios y entornos urbanos
<b>Otros-herramientas de certificación</b>	
HULC ("HULC," n.d.)	Es una herramienta informática que se usa para la verificación de las exigencias 2.2.1 de la sección HE0, 2.2.1.1 y punto 2 del apartado 2.2.2.1 de la sección HE1 del Documento Básico de Ahorro de Energía DB-HE. También permite la verificación del apartado 2.2.2 de la sección HE0 que debe verificarse, tal como establece el DB-HE, según el <a href="#">procedimiento básico para la certificación energética de edificios</a> . Otras exigencias de las secciones HE0 y HE1 que resulten de aplicación deben verificarse por otros medios
Visol (RV Burke, n.d.)	El programa ViSol permite obtener de manera individualizada los datos de demanda obtenidos por la herramienta LÍDER – CALENER para permitir al usuario conocer en qué medida cada elemento constructivo es responsable de las ganancias o pérdidas de calor de los espacios. De esta manera obtenemos información más detallada al estilo de otros programas como DesignBuilder.
Cype ("CYPE," n.d.)	CYPECAD MEP obtiene o facilita la obtención de la certificación energética de edificios nuevos y existentes mediante las opciones simplificadas y general
CE3X ("CE3X," n.d.)	Ha sido desarrollado por Efinovatic y el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER). El programa es propiedad de los IDAE y su distribución es gratuita. La versión actual es CE3Xv2.3. Mediante este programa se puede certificar de una forma simplificada cualquier tipo de edificio: residencial, pequeño terciario o gran terciario, pudiéndose obtener cualquier calificación desde "A" hasta "G".
SGSsave ("Naturalcooling-Optivent," n.d.)	Es, desde el 5 de julio de 2018, documento reconocido para la certificación energética de edificios. Se utiliza para realizar la verificación del DB HE0 y DB HE1 del Código Técnico de la Edificación. Permite modelar el edificio con SketchUp y utiliza como motor de cálculo EnergyPlus. Ha sido desarrollado por DOE (Departamento de Energía de Estados Unidos) y con él se pueden hacer estudios de la demanda y el consumo energético de los edificios. Además, con SG SAVE se puede realizar la verificación del DB HE0 y DB HE1 y la certificación energética de edificios modelados en Revit, importando directamente el archivo gbxml.

Además, en los últimos años y gracias al desarrollo de los programas de cálculo termodinámico y las simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés), el diseño de SVN se ha hecho más factible y accesible a los proyectistas. Así, en la actualidad, el diseño de la ventilación natural en los edificios (Y. Li & Heiselberg, 2017) se sustenta ampliamente en las simulaciones CFD (computational fluid dynamics) (Asfour & Gadi, 2008). Algunos ejemplos son el del "Department of Energy and Refrigerating Air-Conditioning Engineering, National Taipei", que estudió con simulaciones CFD el centro cultural Tjibaou de Renzo Piano en Nueva Caledonia (Department of Energy and Refrigerating Air- Conditioning Engineering, National Taipei University of Technology, 1, Sec. 3, Chung-Hsiao E. Rd., Taipei 106, 2011), o el de Linden (Linden, 1999) que analiza la mecánica de fluidos de la ventilación natural, proporcionando reglas de diseño sobre cómo es el movimiento del aire dentro el edificio. Por

su parte, Ohba y Lun realizan una revisión de la historia de la evolución en la investigación sobre VN y un estudio resumen sobre las bases de investigación de las herramientas CFD (Ohba & Lun, 2010).



**Fig.1.47.** Imagen de simulación en CFD  
("DesignBuilder Software Ltd - Home,"  
n.d.)

Estas herramientas se utilizan también para el análisis y dimensionamiento no sólo del edificio completo, sino de determinados elementos, como el caso de Sacht y Azoia (Sacht & Azoia, 2017) que utilizan CFD para analizar la dimensión de la ventana. En este estudio comprobaron cómo las condiciones de VN se veían influenciadas por las modificaciones en el tamaño de las aberturas y por la variación del ángulo de incidencia del viento, presentando cambios significativos en los valores de los coeficientes de presión promedio y en las tasas de renovación.

Por otro lado, diversas soluciones comerciales se han diseñado también utilizando estas herramientas (L. Li & Mak, 2007; Montazeri & Azizian, 2008; Su et al., 2008a). Song et al. (Song & Meng, 2015) analizaron utilizando CFD, la mejora de la ventilación en el diseño de edificios de uso escolar, Elmualim y Awbi (Elmualim & Awbi, 2016) estudiaron el funcionamiento de los windcatchers, Ohba and Lun (Ohba & Lun, 2010) el efecto de la ventilación cruzada y Khan et al. (Khan, Su, Hopper, & Riffat, 2017) se centraron en el efecto de sistemas de refrigeración.

Diversos autores documentan la utilización las herramientas de cálculo y simulación para el análisis e investigación del diseño de estos sistemas en los edificios, como Cheng J. et al., (Cheng et al., 2018) que apuestan por herramientas de simulación sencillas y adecuadas a edificación, con las que se pueda evaluar el comportamiento de un edificio en el que se diseñe un SVN desde los primeros estadios del proyecto. También utilizan simulación numérica para el análisis Jiang Y et al. (Jiang, Alexander, Jenkins, Arthur, & Chen, n.d.) y Chen Q. y Jiang (Q. Chen, n.d.). Por su parte Mercado et al. (Jiang & Chen, n.d.) estudiaron mediante Energyplus el efecto de la VN en el consumo energético de un edificio bioclimático.

Otro factor clave en el diseño de los SVN es el sistema de control y sus posibilidades (Schulze and Eicker) (Schulze & Eicker, 2013). Mochida et al. (Mochida, Yoshino, & Takeda, 2005) estudiaron diferentes métodos para controlar la circulación del aire a través y alrededor del edificio con ventilación cruzada para mejorar el confort térmico, mediante simulaciones CFD proponiendo controlar la apertura de las ventanas para mantener un valor de PMV en el rango de  $-0.5 < PMV < +0.5$ . En la Fig.1.48 se muestra un ejemplo de ventanas de apertura motorizada existente en el pabellón de exposiciones FIBES en Sevilla.

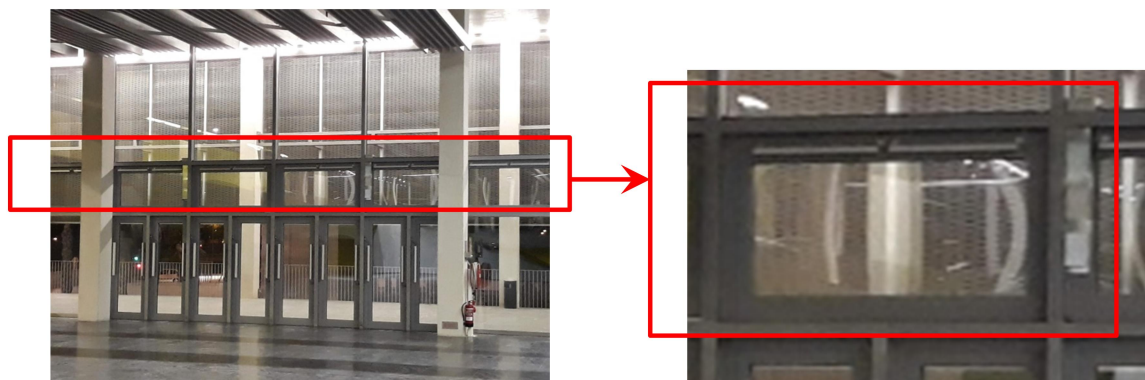


Fig.1.48. Ventanas con apertura automatizada en Fibes (Sevilla). (fuente propia)

## 3.6 Selección de casos

### 3.6.1 Soluciones comerciales

Se han identificado numerosas soluciones comerciales que basan su funcionamiento en los principios de la VN aplicada a edificación. Sin embargo, no se ha encontrado que ninguno comercialice en España, debido a, según conversaciones mantenidas con ellos, las dificultades que plantea la normativa actualmente en vigor en nuestro país. Sin embargo, fuera de España tienen una difusión importante, existiendo numerosos edificios que incluyen estos dispositivos en su diseño.

Los sistemas pueden clasificarse según la estrategia de ventilación que utilicen, pudiendo decirse que existen dos grandes grupos: i) los que se basan en la ventilación cruzada y ii) los que utilizan el principio del efecto “stack” (efecto chimenea).

**Sistemas de ventanas automáticas.** La empresa más importante en este campo es Windowmaster (“Windowmaster,” n.d.), con delegaciones en Dinamarca, Reino Unido y Estados Unidos. Su sistema de ventilación natural (“WindowMaster: Natural Ventilation and Smoke Ventilation,” n.d.) se basa en ventanas motorizadas y sistemas de domótica y control de las mismas en base a diversos parámetros. Proporcionan en su página web manuales de diseño de sus sistemas. También ofrecen soporte técnico así como además, habitualmente realizan “Webinars” y proporcionan material formativo, así como resuelven dudas a los proyectistas interesados en la utilización de su tecnología. Alguno de los “Whitepapers” que se pueden consultar en su web son los siguientes: “How to obtain LEED credits with natural ventilation”; “Savings with natural and hybrid ventilation”; “How to avoid draught using natural ventilation”; “Cost and performance—a design-led approach to effective natural ventilation”; “Natural ventilation in the Priority School Building Programme”.

**Sistemas stack “windcatchers”.** Mondraught (“Mondraught: Engineering delivered. Naturally,” n.d.) es la empresa que tiene la patente de estos dispositivos. Empresa radicada en el Reino Unido y especializada en soluciones de ventilación natural. Tienen dispositivos específicos llamados “Windcatchers”, que funcionan basados en el principio de las torres de viento de Irán. Tiene servicios de consultoría para el cálculo y programas específicos para cálculo, dimensionamiento y diseño. Ofrecen en la web también amplia literatura, así como acciones formativas.



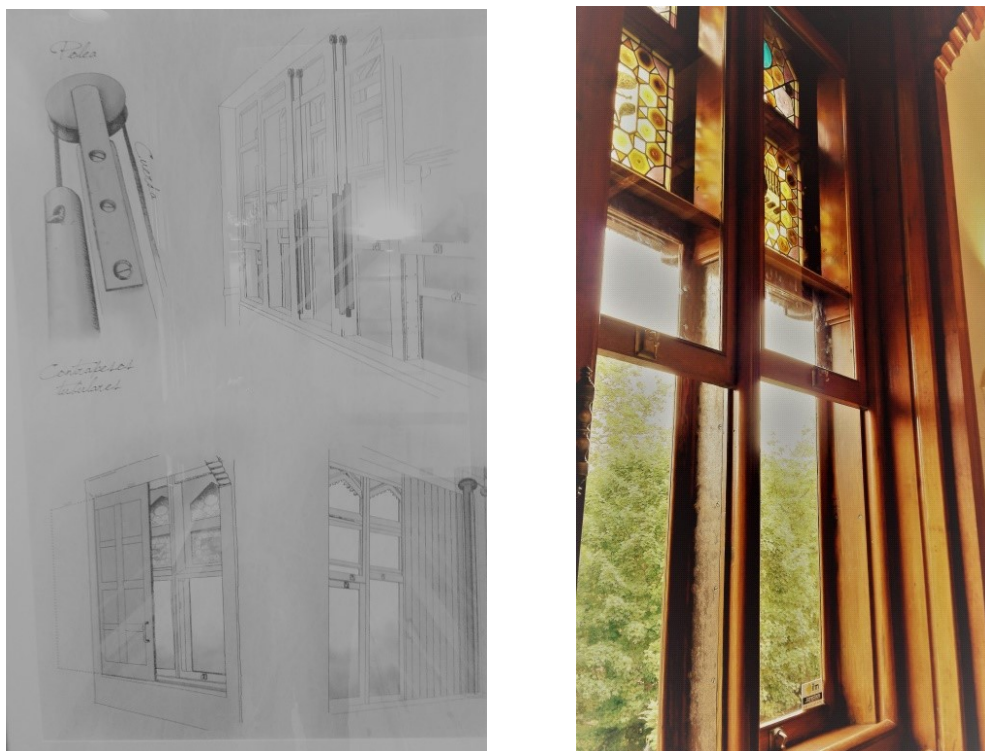
Fig.1.49. Distintos dispositivos para los SVN. Izda) Windcatcher (“Mondraught: Engineering delivered. Naturally,” n.d.); Dcha) Actuador de ventana automática (“Windowmaster,” n.d.)



Otras casas comerciales con dispositivos similares a las dos anteriores son Breathing buildings (“Breathing Buildings,” n.d.); Kingspan (“Kingspan,” n.d.); Windvent (Hughes & Ghani, 2010) y Passivent (“Passivent,” n.d.).

### 3.6.2 Edificios

A lo largo de la historia, la ventilación natural ha sido y sigue siendo la opción preferentemente utilizada en la mayoría de los edificios residenciales. Sin embargo, en los edificios comerciales y de uso no residencial, la ventilación natural pasó de ser la única opción a ser un “arte perdido”, ya que los sistemas de ventilación mecánica y aire acondicionado se convirtieron en la norma durante la segunda mitad del siglo XX. Con el crecimiento en el uso de la ventilación mecánica y el aire acondicionado, el conocimiento existente en el diseño y la integración arquitectónica de los SVN quedó olvidado. Durante el mismo período, se ha producido además un incremento de las expectativas de los usuarios en cuanto al confort térmico, a la par que la caída en desuso de ciertas prácticas de diseño tradicionales. Como resultado, las cuestiones relativas al confort térmico y a la calidad del aire se han visto satisfechas, casi de manera exclusiva, a través del diseño de sistemas mecánicos. En la Fig.1.50 se muestran imágenes del estudio de Gaudí en relación a las aperturas y diversos mecanismos de su edificio “El Capricho” en Comillas (Cantabria).



**Fig.1.50.** Diseño de ventana con propósito de ventilación en “El Capricho de Gaudí” (Comillas). (fuente: propia)

Sin embargo, recientemente y como resultado de la preocupación por el medioambiente, en particular por las emisiones de gases de efecto invernadero de los edificios, el interés en la ventilación natural en edificios no residenciales ha experimentado un resurgimiento (Carrilho & Linden, 2016; Chartered Institution of Building Services Engineers., 2014). De este modo, los últimos 25 años han visto avances significativos en la comprensión y desarrollo de la mecánica de fluidos de la VN, así como el desarrollo comercial de herramientas de CFD que han permitido su aplicación relativamente sencilla edificación, tal como se ha visto en el apartado anterior. Distintos dispositivos de VN comienzan a aparecer en diversos edificios, como los que se muestran en la Fig.1.51.



**Fig.1.51.** Elementos diseñados para ventilación. Izda.) ventanas en el IST de Lisboa (fuente propia); dcha.) aperturas de ventilación con rejillas (reproducido de (CIBSE, 2013))

En la línea de recuperar este conocimiento y aplicarlo a las nuevas edificaciones con la finalidad de mejorar la sostenibilidad y reducir el consumo de energía, existen numerosos ejemplos de estudios a nivel internacional realizados sobre los sistemas de ventilación natural en diferentes localizaciones, tanto en clima frío como en clima cálido. Como se ha mencionado en el apartado anterior, existen organismos y redes centrados en su estudio. Así, como ya se ha visto, por ejemplo, CIBSE tiene una división específica centrada en el estudio de la ventilación natural ("CIBSE - Natural Ventilation Group," n.d.) y publicaciones sobre el diseño de estos sistemas (Steve Irving, Brian Ford & (CIBSE), 2005). También se han localizado otros estudios específicos, en diversas localizaciones y para distintos tipos de edificios. A modo de ejemplo pueden señalarse los siguientes de la Tabla 1.5.

**Tabla 1.5.** Algunos artículos sobre ejemplos de VN

Tipo edificio	Localización	Autor	Estudio
Viviendas	Méjico	Oropeza et al.(Oropeza-perez et al., 2014)	Estudian en el potencial de ahorro de energía que tendría la utilización de sistemas de ventilación natural con fines de refrigeración pasiva. Este estudio se centra en viviendas
Edificios de oficinas	Japón	Nomura y Hiyama (Nomura & Hiyama, 2017)	Estudian en estas soluciones oficinas, donde la previsión de ahorro de energía es importante, al ser espacios con altas cargas internas. Señalan que en Japón el uso de la ventilación natural está cobrando cada vez más interés
Gimnasios escolares	Suiza	Flourentzou et al (Flourentzou, Pantet, & Ritz, 2016)	Centran en el análisis en gimnasios escolares, que tienen una ocupación intermitente con grandes volúmenes de aire, donde la altura del espacio favorece el efecto chimenea. Los autores identifican estos sistemas como sistemas de ventilación de alta eficiencia en el ámbito de los edificios de energía casi nula, indicando que nada tienen que ver con complejos sistemas de ventilación mecánica con recuperador de calor, que a menudo se confunden con este concepto de alta eficiencia
Edificios de oficinas sin aire acondicionado	Alemania, Italia y Turquía (Stuttgart, Turín y Estambul)	Schulze y Eicker (Schulze & Eicker, 2013)	Abundan en este concepto de calificar la ventilación natural como de alta eficiencia desarrollando en su estudio el aspecto de control de la misma. Se centran para ello en analizar mediante simulaciones para determinar el confort térmico y el ahorro de energía anual en edificios de oficinas sin aire acondicionado en las localizaciones de Alemania, Italia y Turquía (Stuttgart, Turín y Estambul), comparando distintas formas de admisión y abertura en las fachadas
Edificio residencial	Túnez	Driss et al (Driss et al., 2015)	Estudian el caso de un edificio con patio que conecta el interior con el exterior. Este patio utilizado tradicionalmente, permite la moderación de clima local dentro del edificio refrescando el aire. Utilizan simulaciones basadas en las ecuaciones de Navier-Stokes que se contrastan y validan con ensayos empíricos en un túnel de viento
Vivienda	Malasia	Homod et al. (Homod et al., 2014)	Los resultados que obtienen concuerdan con el hecho de que la ventilación natural en combinación con la masa térmica pueden reducir el consumo de los sistemas HVAC y establecer el confort térmico en el interior de los edificios

Algunos ejemplos contruidos con una u otra solución de ventilación natural se muestran a continuación. En el caso de uso de ventanas automatizadas podemos señalar el edificio “The Crystal” (Fig.1.52 izda.), ubicado en el Royal Victoria Dock, en el este de Londres, que contiene una exposición permanente de desarrollo sostenible. El edificio está diseñado para funcionar con VN tanto en las oficinas como en la sala de exposiciones a través de un sistema inteligente que controla 91 ventanas de techo a través de 182 actuadores de cadena, gestionado a su vez por un sistema bus KNX. En el caso del Royal Chelsea Hospital, se utilizaron windcatchers (Fig.1.52 dcha.)



**Fig.1.52.** Edificios con VN. Izda) “The Crystal”. Fuente “windowmaster”(“Windowmaster,” n.d.). Dcha) Royal Chelsea Hospital (“Monodraught: Engineering delivered. Naturally,” n.d.)

## 4.- Los edificios de uso educativo en el marco de la sostenibilidad

### Resumen

En este apartado se estudian específicamente los edificios de uso educativo. Se tratan 5 aspectos, comenzándose por conceptos generales como el uso de la energía en relación con la huella de carbono y la sostenibilidad, subrayando el papel ejemplarizante de la administración frente a la sociedad en sus actuaciones en este tipo de edificios en cuanto al tipo de usuario y sus familias. A continuación, se analiza la calidad del ambiente interior de los espacios de uso docente en relación a la calidad de la enseñanza y el aprendizaje. De entre los factores que intervienen en la calidad del ambiente interior, la Calidad del Aire Interior sobresale como uno de los de mayor impacto en este tipo de espacios. Junto con la CAI se identifican también otros factores ambientales como el sobrecalentamiento interior y el concepto aplicable de confort adaptativo. A continuación se describen el tipo y forma de aplicación de los sistemas de ventilación en los edificios escolares, así como los contaminantes más habituales y las tasas de renovación de aire aconsejables. Por último se identifican diferentes fuentes de información que analizan, estudian, investigan e implementan SVN en edificios escolares en diferentes localizaciones, con el ejemplo específico del Reino Unido. Por último se realiza un repaso de la utilización de SVN en edificios de uso docente, mostrando ejemplos concretos existentes en la tradición constructiva andaluza.

Parte de la información y datos recogidos en este apartado fueron presentados en el congreso International Conference on Advances in Energy Systems and Environmental Engineering (ASEE17) con el título "Natural ventilation systems to enhance sustainability in buildings: a review towards zero energy buildings in schools" y publicado en E3S Web of Conferences en 2017 (Gil-Baez, Barrios-Padura, Molina-Huelva, & Chacartegui, 2017b).

### 4.- Los edificios de uso educativo en el marco de la sostenibilidad

4.1	Energía, huella de carbono y sostenibilidad en los edificios de uso educativo .....	97
4.2	Carácter ejemplarizante de la administración .....	99
4.3	La calidad del ambiente interior en los edificios de uso educativo .....	100
4.3.1	La Calidad del Aire Interior en los edificios de uso educativo .....	101
4.3.2	El sobrecalentamiento del espacio interior en los edificios de uso educativo .....	102
4.3.3	El confort adaptativo en edificios de uso educativo .....	103
4.4	Los sistemas de ventilación en edificios escolares .....	104
4.4.1	Tipos de sistemas de ventilación .....	104
4.4.2	Contaminantes .....	105
4.4.3	Tasa de ventilación .....	106
4.5	Ventilación natural y uso docente.....	108
4.5.1	La ventilación natural en edificios escolares .....	108
4.5.2	La ventilación natural en la tradición constructiva de los edificios escolares: Andalucía y otros ejemplos	112



## 4.1 Energía, huella de carbono y sostenibilidad en los edificios de uso educativo

Entre los edificios de uso público, los edificios de uso educativo representan un grupo relevante, con un importante consumo de energía. Sólo en las regiones Mediterráneas de Italia, Grecia, España y Francia, hay aproximadamente 87.000 escuelas (Zemeds project) (ZEMeds, n.d.). Este sector de la edificación consume el 4% de la energía del sector no residencial, en España y el 10% en Reino Unido según recoge Pérez-Lombard et al. (Pérez-Lombard et al., 2008).

Según el estudio de Dias Pereira et al. sobre el consumo de energía en los edificios escolares (Dias Pereira, Raimondo, Corgnati, & Gameiro Da Silva, 2014), se dan diferentes valores de consumo dependiendo del país, lo que supone una dificultad para establecer comparaciones. Esta puede oscilar entre los 10 kWh/m<sup>2</sup> a en Italia y los 278 kWh/m<sup>2</sup> año en Japón en términos de Energía Primaria (EP). Esta diferencia de consumo se encuentra relacionada con el clima de cada localización y los usos y costumbres de cada país así como la forma de diseñar los edificios.

La OMS (WHO Regional Office for Europe, 2015) identifica el diseño de edificios escolares sostenibles como el factor principal para garantizar un ambiente escolar sostenible. Así mismo, sugiere que esto se puede lograr combinando los avances en arquitectura e ingeniería con los enfoques tradicionales del clima y los valores culturales regionales/locales. El informe SINPHONIE (European Commission. Directorate for Health and Consumers, 2014) abunda en la cuestión del diseño de los edificios escolares, exponiendo que la influencia de los modelos arquitectónicos y las prácticas importadas de otras regiones, no siempre se integran apropiadamente de manera que sean coherentes con los valores y las costumbres locales. Esta situación se refleja en el proyecto SEARCH, que identifica problemas en las escuelas alemanas en relación al grado de hermeticidad en edificios (nuevos y renovados) y la falta de ventilación relacionada con ésta (*Guidelines for Indoor Hygiene in School Buildings*, 2008).

Diversos estudios se centran en estudiar las mejoras que se pueden obtener en el confort y los ahorros de energía asociados. De Santoli et al. (De Santoli, Fraticelli, Fornari, & Calice, 2014), lo analizan en los colegios públicos en Roma, creando una base de datos para definir las estrategias de intervención para reducir el consumo de energía, obteniendo como principal conclusión el impacto relevante de la rehabilitación de las envolventes tanto a nivel ambiental como en la reducción de costes de funcionamiento. Ejemplos de estudios de este tipo los hay tanto en clima frío como cálido. En clima frío, Carlos y Corvacho (Carlos & Corvacho, 2010) estudian las envolventes en la zona climática de inviernos severo (I3) en Portugal, obteniendo una reducción de la demanda de calefacción del 52% con actuaciones en la misma. Como ejemplo de mejora también en clima cálido, Abounaga y Moustafa (Abounaga & Moustafa, 2016) estudian las necesidades de refrigeración en el clima cálido de Egipto, estimando ahorros de consumo eléctrico del 15% y un promedio de uso de energía de 14,6kWh/m<sup>2</sup>, mediante una rehabilitación exterior de la envolvente. Si además se integran elementos exteriores, tales como sombras, se puede reducir significativamente la demanda de refrigeración (Ahmadkhani Maleki, 2011) con ahorros de energía de entre el 10% y el 40%. En el caso de edificios de uso educativo, Calama et al. (Carmen María Calama-González, Rafael Suárez, 2018) estudian el ahorro del consumo de energía utilizada para el acondicionamiento e iluminación en aulas en clima cálido mediante la utilización de dispositivos de sombra, obteniendo una reducción en los consumos de aire acondicionado del 50%.

Desde el enfoque del análisis del ciclo de vida (LCA), Alshamrani et al. (Subhi, Galal, & Alkass, 2014) estudiaron en 2014 un modelo integrado de evaluación de sostenibilidad LCA-LEED para edificios escolares, donde integran el análisis del ciclo de vida y la certificación LEED para evaluar la sostenibilidad de los edificios de uso educativo analizando sus estructuras y envolventes. En sus resultados obtuvieron que aunque los edificios construidos con estructura de hormigón y cerramientos de fábrica pueden tener un mayor consumo de energía en determinadas fases del análisis del ciclo de vida, son los edificios con un menor consumo anual y un menor impacto ambiental durante la etapa operacional, presentando un mayor índice de sostenibilidad a lo largo de toda la vida útil de funcionamiento del mismo.

Además, en el planteamiento a realizar para reducir el consumo de energía en los edificios escolares, debe garantizarse simultáneamente la CAI de los espacios. Como ya se ha visto, una mayor hermeticidad conlleva paradójicamente en numerosas ocasiones un mayor consumo de energía para garantizar la calidad del aire, debido

a la operación de los sistemas de ventilación, aunque la intención de diseñar un edificio más hermético sea reducir la cantidad de energía destinada al confort térmico. Dias Pereira et al. (Dias, Neto, Bernardo, & Gameiro, 2017) documentan un caso de este tipo en Portugal. Estudian 6 centros de educación secundaria en Portugal, mostrando cómo, tras realizar un programa de renovación de los edificios en el que se implantaron masivamente sistemas mecánicos de ventilación, obtuvieron como resultado un aumento significativo en el consumo de energía total.

Debe considerarse también el comportamiento del usuario en el patrón del consumo energético del edificio estimado para evaluar su potencial de eficiencia energética y la sostenibilidad de su diseño. Por este motivo, la mejora del funcionamiento y el análisis específico de los edificios de uso educativo son objeto de estudio e investigación a nivel internacional. Claro ejemplo de esto es el desarrollo de numerosos proyectos de investigación entre los que se pueden mencionar los recogidos en la Tabla 1.6.

**Tabla 1.6. Proyectos de investigación centrados en edificios de uso educativo**

Proyecto	Objetivos
<u>Very School</u> ("VERY SCHOOL EU - Valuable Energy for a smart school," n.d.)	Programa Build Up del portal europeo de eficiencia energética en los edificios. Este proyecto propone trabajar sobre la reducción de los consumos de edificios escolares basándose en el uso de las TIC (software y hardware). El punto de partida se basa en que el segmento de construcción escolar es único en edificación, ya que tiene tipologías específicas, usuarios y patrones de uso, infraestructuras energéticas, usos y funciones energéticas específicas y diferentes a las de otro tipo de edificios. Este proyecto integra el software de iluminación LED inteligente, medición inteligente, BEMS, simulación de energía y gestión de la acción energética en una plataforma llamada "Energy Action Navigator" y lo demostrará en cuatro ubicaciones piloto distribuidas en Europa. Los datos de esta plataforma de análisis podrán ser usados para tomar decisiones y abordar colectivamente el problema del ahorro de energía.
<u>Renew School</u> ("RENEW SCHOOL   Quick - affordable - green and healthy," n.d.)	Proyecto cofinanciado por el programa "Intelligent Energy Europe" de la Unión Europea. El objetivo es reducir el consumo de energía en los edificios escolares de manera significativa. Al mismo tiempo, crear y garantizar unas condiciones saludables y confortables para los alumnos y los profesores. Esto debería poder hacerse mediante la renovación de los edificios mediante soluciones rápidas y sostenibles. Se proponen soluciones prefabricadas de madera para la construcción y la utilización de renovables para el suministro de energía, así como otras soluciones lógicas (ventilación inteligente, sombreado)
<b>Centrados en clima mediterráneo</b>	
<u>Teenergy Schools</u> ("Teenergy Schools   High energy efficiency schools in Mediterranean Area," n.d.)	Su objetivo general es promover la eficiencia energética en escuelas de secundaria desarrollando una estrategia común basada en 3 modelos climáticos típicos que caracterizan la zona mediterránea: la costa, la montaña y la ciudad. Como objetivos específicos plantea crear una red transnacional entre socios, y otras autoridades públicas, universidades y organismos técnicos. Los resultados que se obtienen de los ensayos en los edificios existentes también pueden utilizarse para los nuevos edificios que se construyan, implementando acciones de diseño basadas en soluciones tecnológicas para refrigeración pasiva, ventilación e iluminación natural y energías renovables.
<u>Zemeds</u> (ZEMeds, n.d.)	Proyecto cofinanciado por la Unión Europea en el programa "Intelligent Energy Europe". Se centra en la renovación de las escuelas de la región europea de la costa mediterránea, donde representan una parte importante del stock de edificios. En las zonas mediterráneas de Italia, Grecia, España y Francia hay, según este proyecto alrededor de 87.000 centros escolares. Plantean que la obtención de edificios de Consumo Casi Nulo podrá lograrse combinando soluciones de alta eficiencia energética junto con el uso de energías renovables. También muestran que el estudio de soluciones de alta eficiencia energética ha sido muy desarrollado para climas del norte y centro Europa, pero que sin embargo no han tenido el mismo desarrollo en el clima mediterráneo, aun representando el 17% de la población de la Unión Europea (86 millones de personas). En el proyecto analizan la situación de 4 países mediterráneos (Francia, Grecia, Italia y España) en relación con el enfoque de los edificios de consumo casi nulo y la situación actual de los edificios escolares. En el caso de España analiza la situación general que deriva de la aplicación del RITE en cuanto a la tasa de ventilación, haciendo mención a la situación específica de Cataluña, donde la tasa es inferior (8,5 l/s persona en relación a los 12,5 l/s por aplicación literal del RITE), donde siguen el estándar UNE-EN 15251.
<u>ClimAct</u> ("ClimAct. Transition to a low carbon economy in schools," 2017)	Cofinanciado por el programa Interreg Sudoe. Tiene como objetivo apoyar la transición a una economía baja en carbono en las escuelas con cuatro líneas de acción principales, tales como el desarrollo de herramientas de apoyo a las decisiones que accederán e identificarán soluciones sostenibles para las escuelas, basadas en la gestión inteligente de recursos, energía renovable y cambio de comportamiento; Generar nuevos modelos de negocios y nuevas estrategias de gestión para las escuelas; Crear herramientas educativas para aumentar la concienciación sobre las emisiones de carbono, con la asistencia de tecnologías de la información y la comunicación y establecer una red temática en la región de SUDOE, impulsada por una metodología de Living Lab, que generará conciencia y capacitación y fomentará un marco de comunicación entre los usuarios finales y las partes interesadas

Entre otros estudios y proyectos actuales relacionados con la mejora del consumo de energía en los edificios escolares europeos, se encuentran el proyecto "Zemeds" (ZEMeds, n.d.) que promueve la renovación de escuelas

en clima mediterráneo, "School of the Future" ("School of the future," n.d.) que estudia los edificios escolares de consumo casi nulo o "Renewschool" ("Renew School," n.d.) que se centra en la utilización de elementos de madera prefabricados.

En cualquier caso, se consideran necesarios más estudios adicionales para evaluar el impacto de las acciones de eficiencia energética para la tipología concreta de los edificios escolares en clima mediterráneo. Por este motivo y con el objetivo de analizar las localizaciones con un clima más cálido, el Proyecto ClimAct ("ClimAct. Transition to a low carbon economy in schools," 2017), se ha desarrollado dentro del eje prioritario "Low Carbon Economy" dentro del programa europeo Interreg SUDOE. Este proyecto analiza la transición a una economía baja en carbono en escuelas. En su marco de investigación se han desarrollado diferentes publicaciones, tal como se mencionaba en el prólogo. Recientemente, Lizana et al. han publicado un método de evaluación de energía para analizar el rendimiento energético de los edificios escolares y los posibles ahorros de energía, considerando los SVN en el modelo de transferencia de calor (Jesus Lizana, Serrano-Jimenez, Ortiz, Becerra, & Chacartegui, 2018).

## 4.2 Carácter ejemplarizante de la administración

La mejora del rendimiento energético en los edificios en general es una preocupación global. A nivel europeo, se han publicado varias directivas para regularlo (Gil-Baez et al., 2019). La primera versión, (Directive 2002/91/EU on the Energy Performance of Buildings (European Parliament, 2002)), recomendaba acciones orientadas a la optimización en el diseño de los nuevos edificios, de acuerdo con el clima local, con el objetivo de reducir el impacto del consumo de energía a largo plazo, así como acciones orientadas a la renovación del parque construido existente. Esta línea marcada en la regulación fue seguida por las siguientes directivas, como la de la DE 2010/31/EU (European Parliament, 2010), la cual introduce el concepto de Edificios de Energía Casi Nula o Edificio de Consumo Casi Nulo para las nuevas edificaciones (NZEB), subrayando el papel del sector público en este campo.

La DE 2012/27/EU de eficiencia energética (European Parliament, 2012) fue más allá, relacionando este concepto con el enfoque de las inversiones y los gastos de las instituciones públicas, que representan el 19% del producto interior bruto de la Unión Europea. Esta directiva propone la reducción del consumo mediante la implementación de medidas de mejora de la eficiencia energética para poder destinar los recursos públicos para otros propósitos. Además subraya el papel de ejemplo que pueden representar las administraciones públicas a nivel nacional, regional y local, en relación a la eficiencia energética y al cambio climático. Así, siguiendo la línea marcada por las DE, las medidas que se adopten por las administraciones públicas para mejorar la eficiencia energética, servirán de ejemplo para los promotores y propietarios para sus propios edificios.

Desde el punto de vista de las administraciones públicas y su financiación, la instalación y el mantenimiento de las instalaciones y sistemas mecánicos de los edificios, requieren unos gastos de inversión, de mantenimiento y de funcionamiento a lo largo de la vida útil de los mismos, que se puede minimizar si estos sistemas se reducen, tanto en número como en tamaño. Para ello, cada Administración debe partir del análisis de la demanda y el consumo de energía y de sus instalaciones, para conocer los aspectos que se pueden mejorar. Así desde el enfoque del carácter ejemplarizante de la administración, esta reducción en los consumos y en el tamaño de las instalaciones, liberaría fondos públicos que bien podrían emplearse para otros propósitos, con el consiguiente impacto en la comunidad educativa y en la sociedad. Proyectos de investigación como Zemeds (*NZEB renovation for Mediterranean schools*, n.d.) han realizado estudios en este sentido, llegando a definir el ratio de consumo de energía final de un edificio de uso escolar en ámbito mediterráneo, tal como se muestra en la Fig. 1.53.

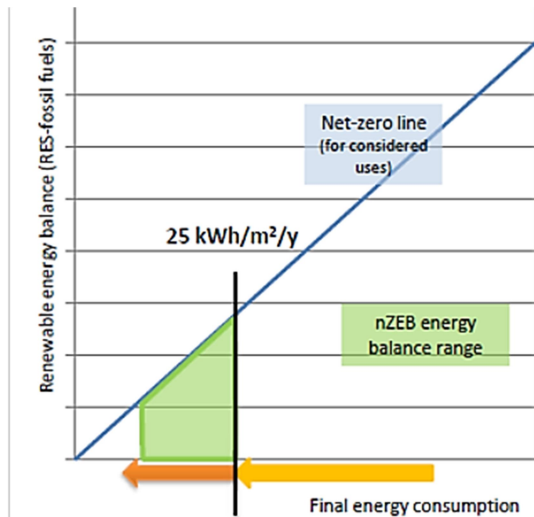


Fig.1.53. Objetivo para alcanzar un edificios escolar de consumo casi nulo en zona mediterránea según proyecto Zemeds (NZE renovation for Mediterranean schools, n.d.).

### 4.3 La calidad del ambiente interior en los edificios de uso educativo

El concepto de calidad del ambiente interior es muy amplio y depende de numerosas variables, como la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del aire, la tasa de renovación de aire, la ocupación, la concentración de contaminantes, el ruido y la iluminación. Según Romana et al. (Romana, Ianniello, & Igor, 2013) es el resultado del confort térmico, visual, acústico y la calidad del aire interior. Los indicadores clave más aceptados en la caracterización de la calidad del ambiente interior son la temperatura y la humedad y el nivel de CO<sub>2</sub> (confort térmico y calidad del aire interior).

La calidad del ambiente interior dentro de un aula se relaciona con la salud, el confort y el rendimiento académico de los estudiantes (Barrett, Davies, Zhang, & Barrett, 2015), y es un factor que debe ser considerado desde el principio del diseño en edificios escolares (Catalina & Iordache, 2012). Barrett et al. (Barrett et al., 2015), analizaron cómo afecta el diseño del aula en el aprendizaje, desde un enfoque amplio en el que se identifican siete parámetros claves de diseño que pueden explicar hasta el 16% de la diferencia en el progreso académico de los alumnos. Tres de ellos, la iluminación, la temperatura y la ventilación están directamente relacionados con la calidad del ambiente interior y el diseño de los edificios.

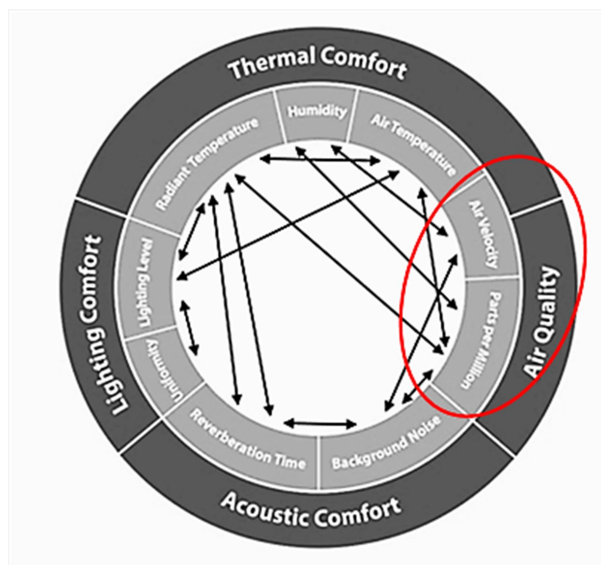
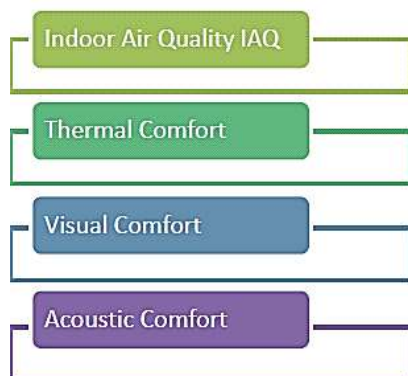


Fig.1.54. La Calidad del Ambiente Interior. arriba) según proyecto Zemeds (NZE renovation for Mediterranean schools, n.d.); abajo) El círculo ambiental. Reproducido de BB 101 (2016) (Department for Education UK, 2016)

Según el BB101 (“Guidelines on ventilation, thermal comfort and IAQ in schools. UK Department for Education”), (Department for Education UK, 2016) y el proyecto Zemeds (*NZEB renovation for Mediterranean schools*, n.d.; ZEMeds, n.d.) la calidad del ambiente interior (IEQ por sus siglas en inglés) se puede representar como en la Fig. 4.2. El círculo ambiental de la figura anterior identifica los factores de diseño ambiental que deben abordarse y los conflictos potenciales entre los factores que deben resolverse. En esta se observa cómo la Calidad del Aire es un apartado importante a tener en consideración junto con otros como el confort térmico, el confort lumínico y el confort acústico. Sadat et al. (Sadat, Tahsildoost, & Hafezi, 2016) muestran también el papel esencial de la ventilación en la determinación de la Calidad del Aire Interior y el confort térmico en edificios educativos. De este modo, la calidad del aire y la ventilación son una parte clave del diseño en relación a la calidad ambiental interior.

#### 4.3.1 La Calidad del Aire Interior en los edificios de uso educativo

En los edificios de uso escolar es esencial mantener una adecuada Calidad del Aire Interior (CAI) en los espacios de uso docente para garantizar el confort y bienestar y el correcto desarrollo de la actividad académica, tanto para los alumnos como para los profesores. En este tipo de edificios, la cuestión de la CAI adquiere un papel especialmente relevante, dado el carácter de las aulas de ser espacios de elevada densidad de ocupación. Según estudios como los de Gao et al. (Gao, Wargocki, & Wang, 2014) y Bakó-Biró (Bakó-biró, Clements-croome, Kochhar, Awbi, & Williams, 2011), en un edificio escolar una buena CAI puede mejorar la concentración de los niños y la productividad de los profesores, mientras que una CAI pobre produce el efecto contrario. Chatzidiakou et al. realizan una revisión crítica de la literatura en relación a lo que se conoce de la calidad del aire interior en las aulas de los colegios (Chatzidiakou, Mumovic, & Summerfield, 2012). Almeida y de Freitas (Almeida & De Freitas, 2014) inciden en este aspecto, considerando que la CAI se ha convertido en un factor relevante para la salud, el confort y la evolución de la población, especialmente en las regiones desarrolladas, donde la gente pasa la mayor parte del tiempo en el interior de los edificios. Numerosos estudios sugieren la correlación de una calidad de aire interior baja con síntomas respiratorios como alergias y asma y otros efectos relacionados con la salud. Estos resultados se presentaron en el proyecto SEARCH (Italian Ministry for the Environment, 2010) que muestra los síntomas que produce en los niños una ventilación pobre o escasa, enfatizando la importancia de la ventilación y la renovación del aire en las clases.

Se han identificado numerosos estudios que evidencian una inadecuada CAI en los edificios escolares, (Almeida & De Freitas, 2014; C. Godwin & Batterman, 2007; Heudorf U, 2007; J. M. Daisey, W. J. Angell, 2003; Kalimeri et al., 2016; Pegas et al., 2011; Rosbach et al., 2013; Rufo et al., 2016; Turunen et al., 2014). Esto sucede en las más diversas localizaciones. Así, Kalimeri et al. (Kalimeri et al., 2016) describieron bajos niveles de ventilación en Grecia. También se identificaron bajos ratios de ventilación en EEUU (C. Godwin & Batterman, 2007). Jovanovic et al. (Jovanović, Vučičević, Turanjanin, Živković, & Spasojević, 2014) determinaron la relación entre la contaminación interior y la exterior en 5 aulas en Serbia. Rufo et al. (Rufo et al., 2016) identificaron bajas tasas de ventilación en Portugal debidas fundamentalmente a hábitos y costumbres inadecuados de los usuarios. Según la investigación de Wargocki y Wyon (Wargocki & Wyon, 2013), esto se debe por un lado a los recursos reducidos de que se disponen para el mantenimiento de los sistemas y por otro lado también es debido al diseño de los edificios orientado a conservar energía, resultando inadecuado en cuanto al diseño de la ventilación. Stafford (Stafford, 2015), analiza el efecto de la calidad del aire en los resultados académicos en colegios en Texas, obteniendo la mejora del rendimiento controlando las renovaciones de aire.

Habitualmente se relaciona la CAI con la ventilación, pero, sin embargo, la Organización mundial de la Salud (WHO Regional Office for Europe, 2015) considera la ventilación como el último recurso para controlar la exposición de los usuarios a los contaminantes. Según ésta, el control de la fuente de contaminantes debe ser la estrategia prioritaria, junto con otros aspectos relacionados con el edificio tales como: i) la localización; ii) el diseño y los materiales; iii) la gestión, el uso y el mantenimiento. Cuando para garantizar la CAI además se usa algún sistema de ventilación, está se vincula con la estrategia de ventilación que se adopte, siendo un elemento clave de diseño de los edificios y su consumo de energía futuro. En el Building Bulletin 101 (2016) (Department for Education UK, 2016), del Departamento de Educación del gobierno del Reino Unido, se muestra cuáles son las diferentes estrategias de ventilación que se pueden utilizar en los edificios escolares (Fig.1.55).



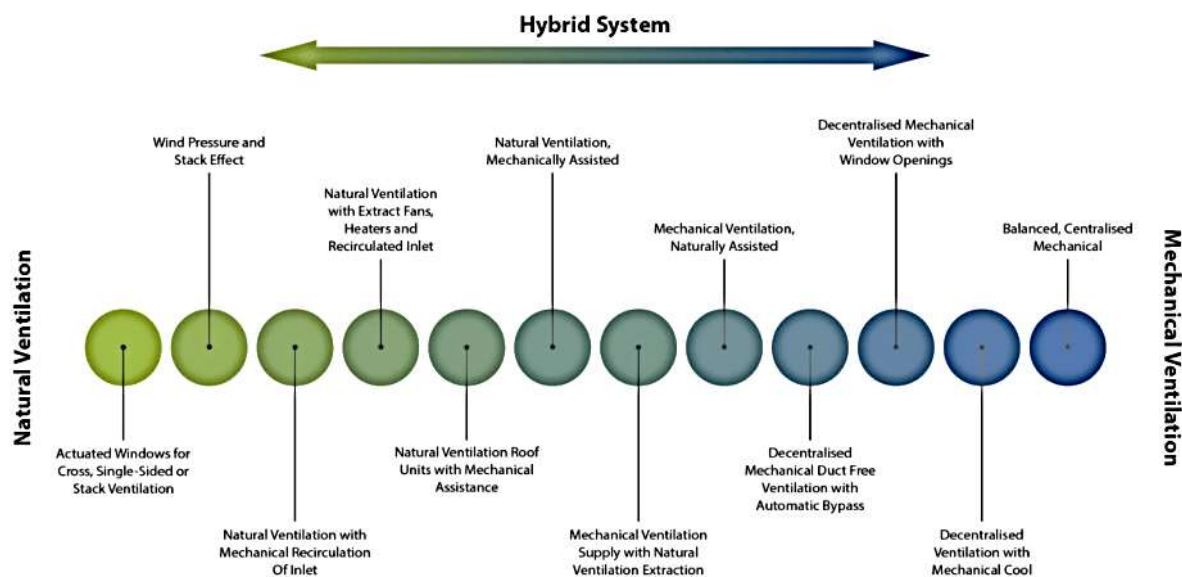


Fig.1.55. Tipos de sistemas de ventilación. Fuente: BB 101 (2016) [17]

El nivel de CO<sub>2</sub> suele emplearse como indicador de la CAI. Estos niveles de concentración de CO<sub>2</sub> dependen de la tasa de ventilación, del tamaño del aula, del número de ocupantes y su actividad y del tiempo que pasan en su interior (Clements-Croome, Awbi, Bako-Biro, Kochhar, & Williams, 2008), por lo que no será el mismo en todos los espacios docentes ni en todas las aulas. De igual modo, no todos los espacios presentarán el mismo nivel de contaminantes. Según Clements-Croome et al. (Clements-Croome et al., 2008), esta concentración de CO<sub>2</sub> puede elevarse a niveles muy altos (aproximadamente 4000 ppm) durante los períodos de ocupación. Por su parte Jovanovi et al. (Jovanovi, Vu, Turanjanin, & Zivkovi, 2014), recomiendan que su control sea prioritario, ya que los niños pasan largos períodos dentro de los edificios escolares y son más susceptibles que los adultos a los efectos adversos de los contaminantes en interiores.

#### 4.3.2 El sobrecalentamiento del espacio interior en los edificios de uso educativo

Los estándares constructivos del siglo XX no contemplaban el factor de la hermeticidad en los niveles actuales, en parte por el desarrollo de la tecnología en aquel momento. De este modo, la ventilación se garantizaba por la apertura y cierre de puertas y ventanas y las propias infiltraciones de la envolvente (Almeida, Ramos, & Freitas, 2016; Romana et al., 2013) como medio para controlar los contaminantes del interior de las aulas (Stabile, Dell, Frattolillo, Massimo, & Russi, 2016).

En las dos últimas décadas, el uso de SVM se ha extendido como medio para garantizar la CAI ahorrando energía (Y. Wang, Zhao, Kuckelkorn, Li, et al., 2014), promovido por una reglamentación técnica que ha sido favorable en este sentido. Se han integrado también recuperadores de calor para reducir los consumos de electricidad e incluso para proporcionar refrigeración nocturna (Y. Wang, Zhao, Kuckelkorn, Li, et al., 2014). Sin embargo, estos SM no proporcionan la CAI esperada en los edificios en todos los casos (Almeida & de Freitas, 2015). Además, en el interior de las aulas, al ser espacios de alta densidad de ocupación, con elevadas cargas internas, la temporada de uso de la calefacción es menor que en otro tipo de edificios, como pueden ser los de uso residencial, de manera que la recuperación de calor sólo será razonablemente rentable y útil en regiones muy frías, cuestión que se expone en el proyecto School of the future (Erhorn-kluttig & Erhorn, 2014).

Según Sadat et al. (Sadat et al., 2016) el sobrecalentamiento en el interior de las aulas se produce debido a las ganancias solares a través de las grandes paños de ventanas, necesarias para una adecuada iluminación natural, los elevados niveles de aislamiento térmico y la minimización de los puentes térmicos de la envolvente, produciendo finalmente falta de confort y reduciendo el rendimiento del estudiante. En consecuencia, las medidas de conservación de la energía deberían ser aplicadas con mucha precaución en las escuelas y en las aulas, analizando

cuidadosamente la operación del edificio desde el enfoque del patrón de uso y funcionamiento. Incluso, según los autores, el ahorro de energía en un edificio escolar debería ser un aspecto secundario.

La norma inglesa de edificios escolares (BB101) (Department for Education UK, 2016), define el sobrecalentamiento máximo admisible dentro del aula en término de número de horas fuera de un rango de temperaturas determinado, estableciendo estrategias de ventilación para ser utilizadas como refrigeración pasiva, con uso prioritario frente a soluciones de refrigeración mecánica. Kolokotroni et al. (I. Pegg, Cripps, & Kolokotroni, 2005) analizan las posibilidades de mejora del sobrecalentamiento en un edificio educativo ubicado en el Reino Unido, mostrando la reducción del sobrecalentamiento mediante la utilización de estrategias de refrigeración nocturna. El uso de éstas es posible gracias al diseño del edificio, con aulas de planta abierta, soluciones de ventilación natural y elementos de sombreado. A su vez, el diseño del aula se muestra como óptimo para proporcionar una muy buena CAI.

Estos autores analizan otros 5 edificios escolares, que denominan “low-energy” (I. M. Pegg, Cripps, & Kolokotroni, 2007), observando cómo las emisiones de CO<sub>2</sub> reales son superiores a las teóricas de diseño. En el análisis desglosado por tipo de energía consumida, comprueban que el consumo de energía de calefacción se redujo con respecto a la media de otro tipo de edificios, mientras el consumo de energía eléctrica fue superior. Esta situación debe ser tomada en consideración a modo de advertencia en la implementación de soluciones para edificios de consumo casi nulo, ya que puede darse este efecto contrario si se implementan de manera masiva soluciones no suficientemente testadas.

#### 4.3.3 El confort adaptativo en edificios de uso educativo

Como ya se ha mencionado, determinados estándares como el EN 15251 o el ASHRAE 55, consideran la posibilidad de establecer los parámetros de confort en el interior de los edificios en base a unos rangos que oscilan en función de las condiciones exteriores en lugar de en base a valores fijos y constantes. Considerando lo anterior, los edificios con VN presentan un interesante potencial de ahorro de energía y reducción la emisión de gases de efecto invernadero si su diseño parte de los estándares de confort térmico adaptativo. El valor de la temperatura máxima aceptable en edificios en oscilación libre se representa en la Fig.1.56.

**For all free-running School Buildings the values for the maximum acceptable temperature ( $T_{max}$ ) are calculated from the running mean of the outdoor temperature ( $T_m$ ) as follows:**

$$T_m = (\Theta_{ed-1} + 0.8\Theta_{ed-2} + 0.6\Theta_{ed-3} + 0.5\Theta_{ed-4} + 0.4\Theta_{ed-5} + 0.3\Theta_{ed-6} + 0.2\Theta_{ed-7}) / 3.8$$

$\Theta_{ed-1}$  is the daily mean external temperature for the previous day

$\Theta_{ed-2}$  is the daily mean external temperature for the day before and so on.

**Fig.1.56.** Valor de la temperatura máxima aceptable en edificios en oscilación libre. “Natural ventilation in the Priority School Building Programme”. (“Windowmaster,” n.d.)

Diferentes estudios muestran además la adaptabilidad de los escolares, tanto en clima cálido como frío, considerándose situaciones de confort con temperaturas fuera del rango de los estándares como el de ASHRAE 55 (ASHRAE Standing Standard Project Committee 55, 2011). A esto cabe añadir una diferente percepción según el nivel socio-económico, mostrándose mayor adaptabilidad en zonas más desfavorecidas (Trebilcock, Soto-Muñoz, Yañez, & Figueroa-San Martín, 2017). Lo estudian De Carvalho et al en Portugal en (de Carvalho et al., 2013), Trebilcock et al (Trebilcock et al., 2017) en Chile y Wong y Khoo en el clima tropical (Wong & Khoo, 2003) de Singapur. En este último caso, obtienen como una de las principales conclusiones que estos estándares no son aplicables a los edificios que funcionan en oscilación libre en este tipo de climas. Estudios realizados en espacios de uso docente en Andalucía (Campano, 2015) documentan una mejor adecuación del indicador de confort adaptativo que los indicadores estáticos tipo PMV, siendo el grado medio de rechazo al ambiente térmico muy bajo y homogéneo.



## 4.4 Los sistemas de ventilación en edificios escolares

### 4.4.1 Tipos de sistemas de ventilación

Existen diferentes estrategias de ventilación que pueden emplearse para proporcionar una adecuada CAI en los edificios de uso escolar (Fig.1.55). Una de ellas es la VN, junto a la que se encuentran otros sistemas mecánicos o híbridos.

Tal como se ha mencionado con anterioridad, ciertos estudios identifican los SVM como los más adecuados para garantizar una adecuada CAI en los edificios docentes. De hecho, hay incluso determinada normativa técnica que los promueve (Ministerio de la Presidencia, 2007). A nivel de investigación, Toftum et al. (Toftum et al., 2015) estudiaron en colegios daneses la relación entre el modo de ventilación y los resultados académicos, concluyendo que se obtenían mejores resultados en las escuelas que tenían VM que en aquellas que funcionaban con ventilación natural abriendo manualmente las ventanas. Wang et al. (Y. Wang, Zhao, Kuckelkorn, Liu, et al., 2014) analizan el funcionamiento de UTAS con recuperadores de calor en un edificio escolar de bajo consumo en Alemania. En Noruega, Thunshelle y Lappegard (Thunshelle & Hauge, 2015) estudian también el estándar Passivhaus aplicado a este tipo de edificios.

Todos los trabajos mencionados se desarrollan en clima frío, pero debe tenerse en consideración que en el sur de Europa, de clima mediterráneo, las condiciones son diferentes a las del norte de Europa. Por tanto, la aplicación de estándares, reglamentos y soluciones técnicas basadas en experiencias en regiones de clima frío no se pueden aplicar a los diseños de nuevos edificios escolares en áreas del Mediterráneo. Así, la vía para llegar a diseñar edificios de bajo consumo de energía o de consumo de energía casi nula debe ser diferente, por lo que se hace necesario el desarrollo de soluciones y estándares específicos que garanticen a la vez las condiciones térmicas y de calidad del aire, evitando a su vez problemas de sobrecalentamiento del espacio interior. No obstante, en los edificios escolares construidos en Europa y España en la última década, se ha extendido el uso de SVM con recuperadores de calor para garantizar la CAI (Gil-Baez et al., 2017a). En el caso de España esto ha sido motivado por la normativa vigente (CTE y RITE) (Ministerio de Fomento, n.d.; Ministerio de vivienda, 2006), que considera el uso docente como no residencial, incluyendo las escuelas en el mismo grupo de edificios de uso terciario que las oficinas, centros de ocio, centros comerciales, etc... claramente diferentes en cuanto a la tipología de edificios, usuario y régimen de uso y funcionamiento. Estos SVM se han trasladado a nuestra normativa de otras procedentes de países de climas fríos, donde la demanda de calefacción es elevada y estos sistemas se han utilizado para reducir las pérdidas de calefacción debidas a la ventilación. Sin embargo, el clima mediterráneo es más suave y los edificios presentan menor demanda de calefacción. En el caso particular de los edificios escolares, debe tenerse en cuenta además el régimen horario y la densidad de ocupación.

Sin embargo, en la práctica se ha demostrado que el uso de SVM en los edificios escolares no proporciona los resultados esperados a lo largo de su vida útil, debido a la falta de recursos para un funcionamiento y mantenimiento correctos, tal como documentan Almeida et al. (Almeida & De Freitas, 2014) en Portugal. A lo anterior hay que añadir el potencial problema de salubridad que pueden inducir estos sistemas en los edificios. Recordemos que Wouters et al. exponen en el ECA Report 23 "Ventilation, Good Indoor Air Quality and Rational Use of Energy" (Ministerio de la Presidencia, 2007), cómo numerosos estudios han identificado los sistemas HVAC en general como una fuente importante de contaminación interior. Otras publicaciones relacionan específicamente el SBS con los SVM de las instalaciones HVAC (Redlich et al., 1997; Skov, 1987).

Una clara alternativa en los edificios de uso docente es diseñar la ventilación con sistemas naturales. Esta solución se encuentra además alineada con las especificaciones de las actuales DE en materia de eficiencia energética en los edificios, las cuales proponen la reducción de energía de los edificios de acuerdo a las condiciones climáticas locales (DE 2010/31/EU (Comisión Europea, 2010)). Toftum et al. (Toftum et al., 2015) y Mishra y Ramgopal (Mishra & Ramgopal, 2015) analizan comparativamente el funcionamiento de los SVN y de los SVM. También Ben-David y Waring los estudiaron comparativamente en edificios de oficinas (Ben-david et al., 2016). Pereira et al. (Luiz, Pereira, Vilain, Tribess, & Morawska, 2015) compararon el riesgo de transmisión de enfermedades infecciosas entre ambos tipos, concluyendo que el riesgo es mucho menor abriendo puertas y ventanas.

Existe una extensa literatura con numerosos trabajos que muestran que con un diseño adecuado de los SVN se pueden obtener niveles de ventilación adecuados y similares a los que se obtendrían con SVM. Khatami et al. (Khatami, Cook, Firth, & Hudleston, 2017) estudiaron dos edificios diseñados con ventilación natural siguiendo los criterios del BB101 (Department for Education and skills, 2006). Utilizaron la simulación termodinámica con límites fijos de CO<sub>2</sub>, en función de los cuales se controlaban los actuadores de las admisiones del aire exterior, obteniendo ahorros en la calefacción del entorno del 30%. En la misma línea Schulze y Eicker (Schulze & Eicker, 2013) estudian el potencial que tiene la VN para ahorrar energía de los refrigeradores y ventiladores.

La utilización de ventanas automáticas puede mejorar los resultados. Esta solución se ha analizado por Stazi et al. (Stazi, Naspi, Ulpiani, & Di, 2017) en Italia, donde muestran cómo la automatización de la apertura de las ventanas garantiza la CAI y el confort térmico a la vez que la satisfacción del usuario. Esto se ha estudiado también en clima más frío como el de Dinamarca, donde Gao et al. (Gao et al., 2014) estudian cómo utilizando estos dispositivos se mejora la tasa de ventilación asegurando una ventilación adecuada. Así mismo, esta solución también se propone en el proyecto SEARCH (Italian Ministry for the Environment, 2010), así como en las publicaciones realizadas en el marco del Proyecto ClimAct ("ClimAct. Transition to a low carbon economy in schools," 2017).

#### 4.4.2 Contaminantes

El proyecto SINPHONIE (European Commission. Directorate for Health and Consumers, 2014) estudia los contaminantes habituales en el interior de los espacios de uso docente, mostrando un marco complejo en el que son de diferente origen, naturaleza y fuente emisora (derivados de procesos de combustión, materiales del propio edificio o componentes de los productos de consumo de los usuarios). Otros artículos estudian el tipo y el nivel de contaminantes en diferentes localizaciones como Portugal (Madureira, Paciencia, Pereira, Teixeira, & Fernandes, 2016; Pegas et al., 2011; Severo, Ramos, Madureira, Barros, & Fernandes, 2016), España (Rivas et al., 2014) y EEUU (C. Godwin & Batterman, 2007). Al-hemoud et al. (Al-hemoud et al., 2017) comparan la CAI en escuelas ubicadas en zonas urbanas y en zonas industriales en Kuwait, mientras que Salthammer et al. (Salthammer et al., 2016), analizan el impacto de las condiciones climáticas y la polución del aire en el bienestar de los alumnos. Gennaro et al. (Gennaro et al., 2014) analizaron también diferentes contaminantes, proporcionando como resultado de sus estudios ciertas recomendaciones para el diseño. Estas incluyen un adecuado diseño de la ventilación y parten de la propia elección de los materiales de construcción y del mobiliario, que deben ser de bajo nivel de emisividad.

No hay muchos estudios que aborden la cuestión de la relación epidemiológica que puede haber entre la exposición a partículas de tamaño PM 10 o PM 2.5 y su impacto sobre la salud (Chatzidiakou et al., 2012; Severo et al., 2016). Del estudio de Madureira et al. (Severo et al., 2016), realizado en Portugal, se desprende la influencia que tiene el propio edificio y la actividad de los ocupantes en la producción de CO<sub>2</sub> y contaminantes, subrayando la incidencia del factor de ser espacios de alta densidad de ocupación. Para evitar esto, ofrecen una serie de recomendaciones relacionadas con la forma de uso y funcionamiento de los edificios, tales como realizar paradas entre clases en la que se lleve a cabo la aireación del espacio, reducir la ocupación a un máximo de 1 persona cada 2 m<sup>2</sup>, aumentar la tasa de renovación del aire interior con aire exterior y mejorar la limpieza de las instalaciones.

El Proyecto FRESH study (Forced-ventilation Related Environmental School Health) (J. Rosbach E. Krop, M. Vonk, J. van Ginkel, C. Meliefste, S. de Wind, U. Gehring, 2016) considera únicamente el CO<sub>2</sub> como contaminante principal y realiza experimentos "in situ" para reducir los niveles de su concentración utilizando un SMV portátil. Sin embargo, la mayoría de los estudios consideran los niveles de CO<sub>2</sub>, como un indicador de los bioefluentes en espacios ocupados de alta densidad (Chatzidiakou, Mumovic, & Summerfield, 2015; Turanjanin, Vucicevic, Jovanovic, Mirkov, & Lazovic, 2014), utilizándose para determinar la CAI, pero no lo consideran como un contaminante en sí mismo (Hazim B Awbi, 1998). Otras publicaciones lo identifican como el indicador principal de la CAI, como Clements-Croome et al. (Clements-Croome et al., 2008) y Almeida et al. (Almeida & De Freitas, 2014). Ramalho et al. (Ramalho et al., 2015) analizan en Francia si es posible establecer esta correlación, concluyendo que aun con niveles de CO<sub>2</sub> bajos, es necesario mantener el nivel de contaminantes bajo para garantizar una buena CAI.

La normativa técnica de diferentes países establece el umbral superior para la concentración de CO<sub>2</sub> en términos de ppm (partes por millón) (Department for Education and skills, 2006; Ministerio de la Presidencia & Ministerio de

Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013). Este umbral varía de unos a otros, oscilando el rango entre los 400-1500 ppm (Chenari et al., 2016), en base a las normas UNE EN13779, SIA 382/1 y DIN 1946-2. Así mismo, la OMS (WHO Regional Office for Europe, 2015) considera niveles aceptables de concentración de CO<sub>2</sub>, cuando todas las fuentes de contaminación se encuentran controladas, los promedios que se encuentren entre 1000 y 1500 ppm durante el periodo de ocupación del espacio.

#### 4.4.3 Tasa de ventilación

Las aulas de los edificios de uso escolar se caracterizan por ser espacios de alta densidad de ocupación. Esta es superior a la de otro tipo de espacios en otros usos (1.8–2.4 m<sup>2</sup>/persona en comparación con oficinas 10 m<sup>2</sup>/persona). Es necesario establecer la ratio mínima de ventilación necesario para garantizar una adecuada CAI, con un consumo mínimo de energía.

La tasa de ventilación en edificios escolares se define habitualmente en las regulaciones técnicas a través de los límites de concentración de los niveles interiores de CO<sub>2</sub> (Associations, Brelh, & Goeders, 2012). Por ejemplo, en Francia se establece una tolerancia de hasta 1300 ppm (Circulaire du 9 août modifiée relative a la revision du reglement sanitaire departemental type (RSDT). Numero complementaire du 13 septembre 1978, 1978), mientras que en el Reino Unido (Department for Education UK, 2016) la normativa establece diferentes límites si los edificios están ventilados con SVM o con SVN (promedio de concentración de 1000 ppm y 1500 ppm respectivamente).

Considerando que los niveles de CO<sub>2</sub> pueden llegar hasta las 4000 ppm durante los periodos de ocupación, si no se lleva a cabo adecuadamente la ventilación, Clements-Croome et al. (Clements-Croome et al., 2008) proponen una metodología para investigar la relación entre la tasa de ventilación y el aprendizaje. La expresión representada más abajo (Fig.1.57) se puede usar para calcular la tasa de ventilación Q requerida para mantener la concentración de un determinado contaminante dentro de un valor deseado según Awbi (Hazim B Awbi, 1998).

$$Q = G / \{ \epsilon_v (c_i - c_o) \} \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

**Fig.1.57.** Tasa de ventilación Q requerida para mantener la concentración de un determinado contaminante dentro de un valor deseado. (reproducido de (Hazim B Awbi, 1998))

Donde:

G es la tasa de contaminante generada m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> o kg s<sup>-1</sup>

C1 es la concentración interior admisible, ppm o mg kg<sup>-1</sup>

C0 es el nivel de concentración exterior del contaminante, ppm o mg kg<sup>-1</sup>

ε<sub>v</sub> es la efectividad del sistema de ventilación

El proyecto HealthVent (Technical University of Denmark, n.d.) se desarrolló con el objetivo de dar pautas de ventilación basadas en la salud y, a través de este proceso, contribuir al avance de las políticas y pautas de calidad del aire interior. En el mismo, se propone un marco que permite determinar los requisitos de ventilación en edificios públicos y residenciales según principios de salud. Carrer et al. (Carrer et al., 2018) resumen los resultados del proyecto. Entre las conclusiones, exponen que la tasa de ventilación para garantizar la salubridad no debe ser inferior a la ventilación mínima de 4 l/s y persona, por lo que los estándares de ventilación y los sistemas que se diseñen deben cumplir con estas pautas. En el documento final del proyecto, del año 2012, (Associations et al., 2012) se presenta un resumen de los rangos de ventilación en distintos países y según los usos, así como distintos sistemas de ventilación utilizados. La investigación bibliográfica que realizan muestra 5 estudios, que se realizaron en una muestra de 8 escuelas. En el resumen de resultados compara sistemas de ventilación natural y mecánica en países nórdicos de clima frío, concluyendo que la VN es “insuficiente”. Sin embargo, este resumen puede calificarse como excesivamente simplista, ya que no realiza un análisis profundo de los tipos de sistemas, y en la ventilación natural identifica sólo la apertura de ventanas en fachada, lo cual no constituye un sistema de ventilación diseñado al efecto.

Por otro lado, otros investigadores han analizado la tasa de ventilación en las aulas y su relación con problemas operacionales en funcionamiento de los SVM, tanto en clima frío como en clima suave. En el primer caso, el SVM

analizado por Wargocki y Wyon (Wargocki & Wyon, 2013), no proporcionaba una adecuada CAI debido a que su funcionamiento estaba enfocado fundamentalmente al ahorro de energía, y en el segundo caso, en Portugal, Almeida et al. (Almeida & De Freitas, 2014), muestran cómo en edificios rehabilitados en los que se incluyeron sistemas mecánicos para garantizar la CAI tampoco se obtenía el resultado esperado, dado que no se usaban por su elevado coste operacional.

Aun siendo una alternativa viable la aplicación de SVN en lugar de SVM, deben diseñarse sistemas de ventilación que permitan superar las limitaciones de la ventilación a una cara mejorando su eficacia. Esto puede lograrse introduciendo estrategias como la ventilación cruzada, que se puede combinar a su vez con dispositivos que permitan beneficiarse del efecto chimenea. En esta línea, Hellwig, et al. (Hellwig et al., 2017) estudiaron la capacidad de mejora de los ratios de ventilación en una escuela en Alemania, utilizando antiguos dispositivos de ventilación por efecto chimenea que estaban en desuso (Fig.1.38). Obtuvieron como resultado que podían proporcionar un volumen de ventilación en invierno de 14 m<sup>3</sup>/h.pers, siete veces superior al que se obtenía de la mera ventilación con ventanas, con la que se obtenían 2 m<sup>3</sup>/h.pers.

En cuanto a la tasa de ventilación en relación al consumo de energía, debe analizarse el balance energético, buscando un equilibrio en el diseño (Fig.1.17). En ocasiones, la pérdida de energía empleada en calefactar los espacios en invierno debida a la ventilación de los mismos, que se realiza introduciendo aire exterior a menor temperatura, es una preocupación que se suele resolver mediante la introducción de unidades de recuperación de calor. No obstante, el consumo eléctrico de estos elementos conlleva un uso adicional de energía eléctrica, frustrando la eficiencia energética de los sistemas por la reducción del consumo de energía, así como la reducción de la huella de carbono. Además, estos elementos requieren un compromiso de mantenimiento continuo para asegurar que los filtros se sustituyen con regularidad y que los conductos se mantienen limpios, que de no llevarse a cabo puede conllevar un deterioro de la salud de los ocupantes ("Monodraught: Engineering delivered. Naturally," n.d.).

Según estudios que se centran en los SVN, en la práctica, en los centros escolares, estas pérdidas del sistema de calefacción no son más que una carga adicional que hay que tener en cuenta en el cálculo del sistema de calefacción. Concretamente, la empresa Monodraught ("Monodraught: Engineering delivered. Naturally," n.d.) realiza el análisis sobre la base de un promedio de temperatura exterior diurna en invierno de entre 6° y 12°C y una temperatura interior de 20°C. Según se refleja en la Fig.1.58 el requisito de BB101 para una concentración media de dióxido de carbono diaria que no exceda 1500 ppm, se puede cumplir con un aporte de calor de menos de 100 W por ocupante.

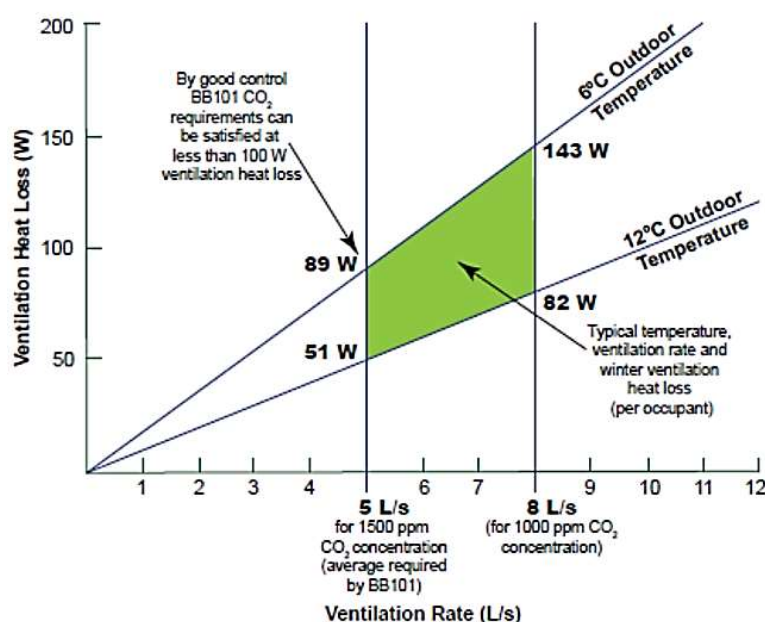


Fig.1.58. Balance energético. Fuente Monodraught ("Monodraught: Engineering delivered. Naturally," n.d.).

En la Fig.1.58 se representa en el eje de abscisas el ratio de ventilación en l/s según los requerimientos del BB101 inglés, y en el eje de ordenadas las pérdidas de calor en W. En la práctica se puede esperar que estas pérdidas se compensen parcialmente con las ganancias debidas al calor metabólico producido por los ocupantes combinados así como las debidas a la iluminación, los equipos informáticos y otras fuentes (“Monodraught: Engineering delivered. Naturally,” n.d.).

En cuanto a los niveles de referencia para el control de la CAI, la especificación más exigente de concentración de 1000 ppm de CO<sub>2</sub> también se puede lograr sin una significativa demanda extra de calefacción, siendo esencial el control para reducir al mínimo la pérdida de calor debida a la ventilación. Esto es necesario para asegurar que la tasa de ventilación se adapta continuamente a las concentraciones que se producen debidas a la ocupación y para evitar un número excesivo de renovaciones durante los períodos de no ocupación. Tal control se puede conseguir de manera más eficiente asegurando la hermeticidad del edificio y manteniendo de manera controlada la concentración de CO<sub>2</sub> en un rango entre 1000 a 1500 ppm. Por la noche, cuando las temperaturas exteriores alcanzan sus valores más bajos, la demanda de la ventilación se reduce en gran medida y por lo tanto la pérdida de calor debida a la ventilación nocturna también, considerándose despreciable (“Monodraught: Engineering delivered. Naturally,” n.d.).

## 4.5 Ventilación natural y uso docente

### 4.5.1 La ventilación natural en edificios escolares

La mayor parte de los edificios en general, y los edificios de uso escolar en particular, tradicionalmente se han ventilado por medios naturales. De hecho, la VM surgió asociada a los sistemas mecánicos de refrigeración y a “nuevos” tipos de edificios como los grandes edificios de oficinas y centros comerciales, habitualmente diseñados con grandes paños acristalados no practicables. Concretamente en el caso de España, donde la importancia de la ventilación en los edificios escolares estaba ya presente en la normativa estatal del año 1923 (“Instrucciones Técnico-higiénicas”), no es hasta el año 2008, con la entrada en vigor del RITE 2007 (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013), que se empieza a hablar de SVM en edificios de uso escolar. Así, la normativa y la industria ha intentado imponer de algún modo estos SVM, sin éxito en muchos casos y provocando potenciales problemas de difícil solución y gran trascendencia como el SBS.

Por otro lado, los edificios escolares presentan una serie de características particulares (ventanas amplias practicables, ventilación cruzada a pasillos, etc.) que hacen que sea sencillo implementar en su diseño estrategias de VN. Sin embargo, al igual que Schulze y Eicker (Schulze & Eicker, 2013) exponen para los edificios de oficinas, estos sistemas aún no se aplican ampliamente porque hay información limitada disponible sobre el diseño y su efecto en el confort térmico y la CAI, dándose una situación similar en los edificios escolares. En casos de edificios existentes estudiados en Reino Unido, se muestra cómo la VN es capaz de proporcionar una adecuada y suficiente ventilación en invierno sin dar lugar a pérdida de energía excesiva (“Monodraught: Engineering delivered. Naturally,” n.d.). El poder aplicar esta solución en clima mediterráneo sería de gran interés, dadas las temperaturas suaves y las condiciones que lo caracterizan. Así mismo, la VN se encuentra alineada con las regulaciones europeas vigentes sobre eficiencia energética en edificios, que proponen la reducción de la demanda de energía teniendo en cuenta las condiciones climáticas locales (DE 2010/31/UE (European Parliament, 2010)). Así, aprovechar estas características para la ventilación supone una opción interesante, pero debe tenerse en cuenta desde las primeras etapas de diseño de los edificios, con una evaluación adecuada de los vientos dominantes, la orientación de las fachadas, etc.

Por último, cabe destacar que la normativa de diferentes países prescribe como solución preferente o al menos considera el uso de SVN en el diseño de los edificios escolares, según se refleja en la Tabla 1.7.



**Tabla 1.7.** La ventilación natural en el marco de la normativa de edificios escolares

País	Sistemas de Ventilación Natural	Norma / documento	Año de publicación
Reino Unido	Si	(Department for Education and skills, 2006) BB 101	2006
Alemania	Si	(Guidelines for Indoor Hygiene in School Buildings, 2008)	2008
Australia	Si	(Building schools in the 21st century and Current thinking about learning for a lifetime, 2009) Building schools in the 21st century and Current thinking about learning for a lifetime	2009
		(Division & Development, 2011) Building Quality Standards Handbook	2011
Escocia	Si	(Executive, 2007) School design: optimising the internal environment building our future: Scotland's School State	2007
Irlanda	Si	(Document, 2009) Technical guidance document F	2009
Nueva Zelanda	Si	(BRANZ Ltd for the Ministry of Education, 2007) Designing quality learning spaces: ventilation & indoor air quality	2007

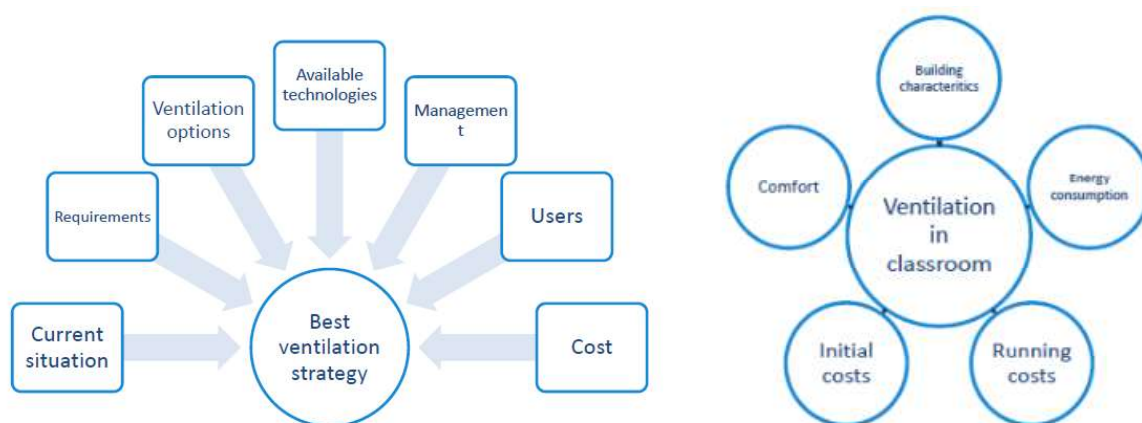
Como se observa en la Tabla 1.7, en numerosos países como Reino Unido (Department for Education UK, 2016; Department for Education and skills, 2006), Alemania (Moriske & Szewzyk, n.d.), Australia (*Building schools in the 21st century and Current thinking about learning for a lifetime*, 2009; Division & Development, 2011), Irlanda (Document, 2009) y Nueva Zelanda (Quality & Spaces, n.d.), los SVN son los preferidos en el diseño de edificios escolares o al menos se tienen en consideración a la hora de seleccionar el sistema de ventilación para el edificio que se proyecta.

La experiencia documentada más importante en VN en escuelas se ha encontrado en el Reino Unido, donde el Departamento de Educación tiene publicado un reglamento específico sobre la ventilación en los edificios escolares (BB101) (Department for Education and skills, 2006). Este documento presenta la VN como la primera solución que debe considerarse en el diseño de edificios escolares, mientras que los sistemas de VM se consideran como última opción, no deseable, debido a los costos y requisitos de inversión, operación y mantenimiento, que pueden derivar en problemas relacionados con el SBS tener implicaciones negativas para la salud. En este caso del Reino Unido, es de especial relevancia el apoyo que ha supuesto apostar por este tipo de soluciones al crecimiento y expansión de empresas locales que diseñan, fabrican, instalan y comercializan dispositivos de VN especialmente diseñados para entornos académicos ("Breathing Buildings," n.d.; "Windowmaster," n.d.; Dehnavi, Ghadiri, Mohammadi, & Ghadiri, 2012; Jones & Kirby, 2009b; Jones et al., 2016; Richard et al., 2012).

En cuanto a la normativa técnica actualmente vigente en España, ésta no se encuentra desarrollada específicamente en el ámbito de la VN, aunque sí contempla un marco detallado para el diseño de sistemas mecánicos en edificios de uso no residencial (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013) entre los que engloba a los de uso docente (según se vio en el apartado anterior). Esta normativa recoge la posibilidad de desarrollar otros sistemas alternativos para garantizar las exigencias técnicas de confort térmico, CAI, salubridad, eficiencia energética etc..., pero la definición técnica de estas alternativas no se encuentra desarrollada aún. Esta situación favorece la instalación y el diseño de los SVM en los colegios ante la falta de otras opciones, ya que los técnicos no tienen otra regulación que ofrezca pautas sencillas, como el caso del RITE para VM, a la que puedan acudir fácilmente para la redacción de los proyectos, sin tener que realizar comprobaciones adicionales. Esta situación es similar en otros países como Suiza (Flourentzou & Pantet, 2014) o Portugal, donde se han encontrado trabajos de investigación para mejorar el consumo de energía de los sistemas de ventilación, como el de Pereira (Pereira, 2016), el cual ni siquiera menciona la opción de utilizar SVN.

Sin embargo, sí se han identificado recientes trabajos de I+D en varios países orientados a evaluar el efecto del uso de los SVN en el diseño de edificios escolares, para garantizar la CAI reduciendo el consumo de energía. Por ejemplo, Stabile et al. en Italia (Stabile et al., 2016) estudiaron la ventilación con ventanas, en Saviese-Switzerland, Flourentzou et al. (Flourentzou et al., 2016) proponen el uso de chimeneas de ventilación en comparación con un complejo sistema de ventilación mecánica y en Tailandia Nitatwichit et al. (Nitatwichit et al., 2008) estudiaron la VN y también la refrigeración pasiva.

En cuanto a proyectos de investigación específicos puede señalarse el proyecto europeo SINPHONIE (Edurado, n.d.), el cual proporciona una guía para diseñar espacios escolares saludables, en la que se recogen estudios y recomendaciones en relación a la mejora de la CAI en edificios docentes en Europa. En éste se identifican los SVN como soluciones de ventilación viables y factibles. Como componentes principales describen las ventanas automáticas activadas a través de dispositivos indicadores. Como medida adicional, recomienda que la ventilación se haga coincidir con los intermedios de las lecciones. El proyecto Zemeds (*NZEB renovation for Mediterranean schools*, n.d.) profundiza en los criterios que deben tenerse en cuenta para la selección de la mejor estrategia de ventilación para cada caso. Entre estos se encuentran tanto el coste, como el tipo de usuario, las opciones existentes, las tecnologías disponibles, etc... Así mismo, se identifica la necesidad de tener en consideración tanto el confort como el consumo de energía, los costes de funcionamiento e iniciales como las características del edificio. El esquema de los factores que pueden influir en la decisión se representa en la Fig.1.59.

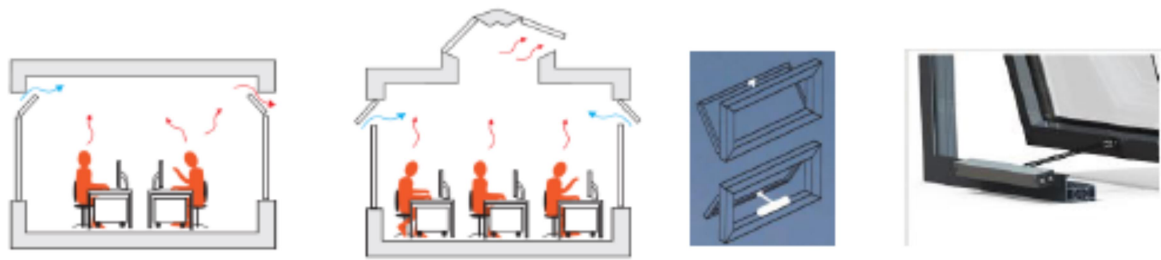


**Fig.1.59.** Criterios de selección de la mejor estrategia de ventilación según el proyecto Zemeds (*NZEB renovation for Mediterranean schools*, n.d.)

A la hora de diseñar un SVN para edificios escolares, debe tenerse en consideración, en cuanto a la estrategia más eficaz, que la ventilación cruzada ofrece mejores resultados que la de ventilación a una cara (Ohba y Lun (Ohba & Lun, 2010) y Nitatwichit et al. (Nitatwichit et al., 2008)). Gajewski y Gładyszewska-Fiedoruk (Gładyszewska-Fiedoruk & Gajewski, 2012) observaron también que la ventilación por efecto chimenea puede garantizar una CAI adecuada dentro de los edificios durante el invierno. Estos añaden además el factor de la incidencia del viento en el rendimiento de la ventilación de la chimenea, pudiendo llegar a ser el flujo de aire extraído hasta 3,5 veces mayor con viento que sin viento.

Junto a lo anterior, la automatización de las ventanas ha sido estudiada como medida para mejorar y optimizar las tasas de ventilación que se obtienen a través de las mismas. Gao et al lo estudian en Dinamarca (Gao et al., 2014) y Stazi et al estudiaron la misma solución en Italia (Stazi et al., 2017). Esta solución también se propone en el proyecto SEARCH (*Guidelines for Indoor Hygiene in School Buildings*, 2008) y Zemeds (*NZEB renovation for Mediterranean schools*, n.d.), según se refleja en la Fig.1.60. Otros estudios como el de Clements-Croome et al (Clements-Croome et al., 2008) en Inglaterra, trabajan en la ventilación por desplazamiento, analizando los ratios de ventilación en aulas. Almeida y De Freitas en Portugal (Almeida & De Freitas, 2014) comparan edificios renovados y no renovados bajo este enfoque de la ventilación.



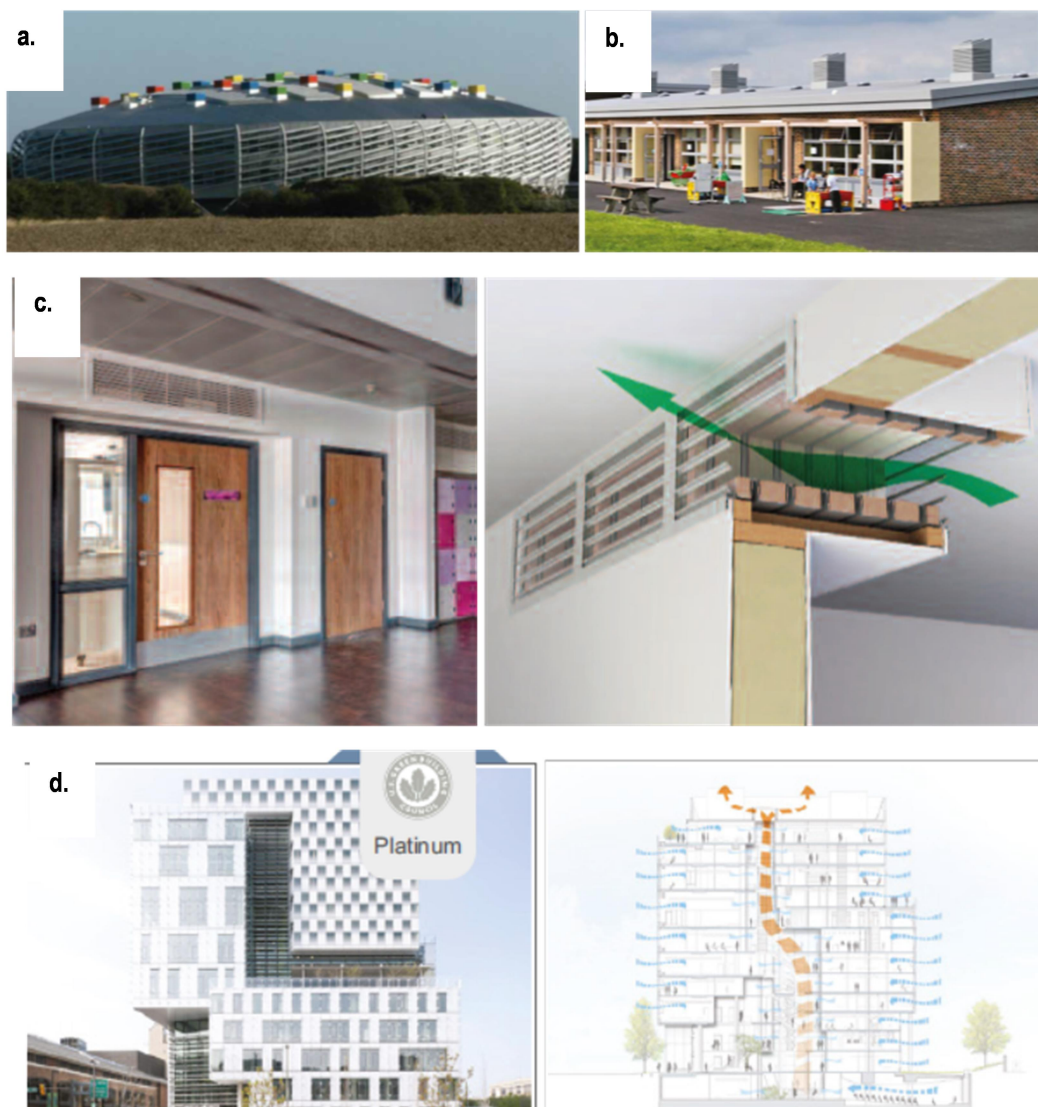


### CONTROLLED NATURAL VENTILATION

### KEY ELEMENTS

**Fig.1.60** Recomendaciones para el diseño de sistemas de Ventilación Natural del proyecto Zemeds (NZEB renovation for Mediterranean schools, n.d.)

Por último, en la Fig.1.61 se muestran diferentes soluciones de VN implementadas en edificios escolares en diversas localizaciones del Reino Unido y EEUU.



**Fig.1.61.** Edificios escolares con SVN. a. Monkseaton highschool (Tyne and Wear) ("Breathing Buildings," n.d.); b. Seaside school (Lancing) ("Monodraught: Engineering delivered. Naturally," n.d.); c. Valleys School (Bridgend) ("Passivent," n.d.); d. Facultad de derecho Universidad de Baltimore ("Windowmaster," n.d.)

#### 4.5.2 La ventilación natural en la tradición constructiva de los edificios escolares: Andalucía y otros ejemplos

Como ya se ha mencionado, en el Reino Unido, existe la práctica extendida de diseñar los centros educativos con SVN, teniendo una normativa específica para ventilación en edificios escolares. Algunos ejemplos se muestran en la Fig.1.62.



**Fig.1.62.** Distintos ejemplos de edificios escolares con SVN. (Fuente: Monodraught ("Windowmaster," n.d.), Windowmaster("Monodraught: Engineering delivered. Naturally," n.d.))

En otras localizaciones, diferentes estudios analizan la utilización de soluciones de VN tradicionalmente utilizadas en los colegios, tal como el que presentan Kotani et al. (Kotani, Goto, Ohba, & Kurabuchi, 2017), que muestran una revisión de artículos de investigación centrados en soluciones de ventilación cruzada. Así mismo, el efecto chimenea

también se estudia en (Jones et al., 2016) con el diseño de windcatchers para colegios. En Alemania, Hellwig et al. (Hellwig et al., 2017) muestran el funcionamiento de soluciones de ventilación en aulas basadas en el efecto chimenea y estudian la posibilidad de volverlas a incorporar en el diseño actual de los edificios escolares (Fig.1.38). Dispositivos similares fueron usados en el siglo XX en los centros educativos en Andalucía, tal como se presentó en el congreso AIVC 2017 (Gil-Báez et al., 2017) y se muestra en la Fig.1.63.



**Fig.1.63.** Chimenea de ventilación de un aula en la cubierta de un centro escolar en la provincia de Sevilla (fuente propia)

Sin embargo, la evolución en el diseño de los edificios, de la normativa técnica y el cambio de algunos hábitos de los usuarios finales de los edificios, han hecho que exista una falta de experiencia y de un adecuado marco de conocimiento que sustente el diseño de los mismos, por lo que estas soluciones han sido olvidadas en el diseño de los nuevos edificios, sin identificarse ningún edificio nuevo desde los años '80 con este tipo de SVN.

En el año 2008, a raíz de la entrada en vigor del nuevo RITE, la Consejería de Educación, en base a su extensa experiencia en la construcción y en la gestión de edificios escolares a lo largo de su vida útil, observó que existía la posibilidad de que los nuevos SVM no proporcionasen el resultado esperado. Junto a esto, su implementación supondría además una modificación radical en la forma de diseñar los edificios escolares hasta el momento, así como un impacto importante en los costes iniciales y operacionales. Para confirmar o rebatir lo anterior, contrató un estudio sobre la implementación de los SVM en los edificios de uso educativo y sus posibles alternativas. Este estudio fue financiado por el Ente Público de Infraestructuras Educativas (Junta de Andalucía, n.d.), dependiente de la Consejería de Educación y se encuentra publicado con el título “Proyecto Academia Estudio comparativo de sistemas de calefacción y climatización en los proyectos de centros docentes en Andalucía, fase I y fase II” (Grupo TEP 130, n.d.). El estudio finalmente no aportó alternativas a la VM y se centró en la aplicación del RITE 2007 y sus Instrucciones Técnicas, obteniéndose como resultado principal el incremento de los consumos de energía y de las emisiones de CO<sub>2</sub> para todos los casos y zonas climáticas por encima del 100%, debido a la incorporación del nuevo SVM en el diseño del edificio. En el estudio se justificaba la mejora de la CAI al introducir aire exterior filtrado a través de UTAs.

No se han encontrado estudios concretos, investigaciones, ni tesis doctorales que analicen la cuestión CAI-VN-sostenibilidad en edificios escolares en Andalucía. La única referencia que se ha identificado publicada en la Universidad de Sevilla (US) es la tesis de Campano Laborda (Campano, 2015) con el título “Confort térmico y eficiencia energética en espacios con alta carga interna climatizados: aplicación a espacios docentes no universitarios en Andalucía”, donde se centra en la cuestión del confort, realizando recomendaciones para el diseño

de los sistemas de calefacción. En general, los planteamientos que realiza se basan en soluciones de VM, sin analizar la cuestión de la VN ni plantearla como opción alternativa. Sin embargo, en este estudio es de interés la mención que realiza en cuanto a los indicadores de confort, concluyendo que el alumno presenta una mejor adecuación al indicador de confort adaptativo que a los indicadores estáticos tipo PMV (siendo el grado medio de rechazo al ambiente térmico muy bajo y homogéneo, así como la sensación térmica en invierno neutra y moderadamente cálida en entretiempo).

En la cuestión de la sostenibilidad asociada a soluciones pasivas, puede hacerse referencia a la tesis, también de la US, de Pérez Rendón (Pérez Rendón, n.d.) “De profundis: herramientas de simulación del potencial energético de la tierra en arquitectura”, en la que analiza la combinación de soluciones de VN con geotermia para favorecer la utilización de soluciones de refrigeración pasiva. En este caso centra su estudio en edificios residenciales en clima tropical.



## 5.- Conclusiones del Capítulo 1

En el Capítulo 1 se ha realizado una extensa revisión del Estado del Arte. En él se han tratado las cuestiones relativas a los SVN en el marco de la sostenibilidad con el enfoque particular de los edificios de uso docente en clima mediterráneo, partiendo de cuestiones más generales hacia otras más particulares. La información recopilada constituye un amplio conjunto de evidencias que muestran los SVN como soluciones viables, factibles y sostenibles para garantizar la CAI reduciendo la huella de carbono en edificios escolares en clima mediterráneo. Los aspectos más relevantes observados se resumen a continuación.

**La sostenibilidad y el desarrollo sostenible.-** En este apartado se han tratado las cuestiones relacionadas con la sostenibilidad y la eficiencia energética. Enfocado en los edificios, el edificio más sostenible es el que menos consume, no tanto por la eficiencia de sus sistemas, sino porque no los necesite. Los sistemas que más energía consumen en los edificios en general son los de HVAC. En la zona mediterránea en particular son los relacionados con la refrigeración. Las soluciones arquitectónicas bioclimáticas, y en algunos casos aquellas que se pueden recuperar de la arquitectura vernácula, son prometedoras en cuanto a su eficaz desempeño para obtener edificios de bajo perfil de consumo energético. Entre las distintas soluciones bioclimáticas que pueden colaborar en la reducción de la demanda de refrigeración, la VN destaca como una de las más interesantes, conocida como “ventilative cooling” o refrigeración pasiva. La refrigeración pasiva se encuentra también íntimamente ligada a la definición del concepto de confort adaptativo para definir el confort térmico de las personas en los espacios interiores. Por otro lado, el confort adaptativo no es de aplicación exclusiva a los sistemas pasivos de refrigeración, ya que es un concepto que bien empleado para el diseño de sistemas activos de acondicionamiento térmico puede proporcionar una reducción en la demanda de calefacción y refrigeración en los edificios. Así mismo, las soluciones basadas en la utilización del aire exterior, colaboran también en la mejora de la **CAI**, tal como se desarrolla en el siguiente capítulo.

**La CAI.-** De entre los factores que determinan Calidad del Ambiente Interior, destaca la CAI, necesaria para una adecuada salubridad de los espacios. Existe una fuerte vinculación entre la ventilación y el ahorro de energía, por lo que la normativa se ha centrado en reducir las infiltraciones en los edificios y en incrementar el aislamiento de las envolventes. Ambos factores han contribuido en ocasiones al empeoramiento de la CAI y al incremento del sobrecalentamiento en los espacios interiores. En estas circunstancias, el diseño y cálculo de los sistemas de ventilación ha cobrado mayor importancia, siendo necesaria la optimización entre el volumen de renovaciones, la concentración de contaminantes y el consumo de energía. Se ha identificado el CO<sub>2</sub> como el gas trazador que suele emplearse para evaluar la CAI, observándose que no es un contaminante en sí mismo, no siendo nocivo en los niveles que habitualmente se dan en edificación. Se han enumerado los sistemas de ventilación más habituales, subrayándose la problemática que relaciona los SVM con un mayor nivel de contaminantes y el SBS, así como la alternativa que suponen los **SVN** para solucionar los dos problemas mencionados anteriormente (energía y SBS)

**Los SVN.-** En este apartado se ha tratado ampliamente y de manera específica el tema de la VN, analizando sus fundamentos de funcionamiento, su relación con el clima y la viabilidad de su utilización para el ahorro de energía en los edificios. Se han descrito las diferentes estrategias de diseño, que ayudan en la clasificación del tipo de sistemas, así como su diferente nivel de eficacia. También se ha visto cómo la VN no es un concepto que pueda incorporarse al proyecto con posterioridad a la formalización del diseño, sino que debe estar presente desde las primeras reflexiones, dado que estos sistemas y su desempeño están íntimamente ligados al clima, a la localización geográfica del edificio, su posición relativa en la zona urbana, etc... Así mismo, el uso del edificio, que condicionará la organización de los espacios, también es un factor a tener en cuenta a la hora de su diseño.

Por otro lado, aunque las herramientas de certificación actualmente accesibles en España no consideran estos sistemas, existen programas de cálculo y simulación que permiten evaluar su potencial y dimensionarlos, incluyéndolos en el balance termodinámico de los edificios. Se ha mostrado también una relación de las principales empresas que comercializan este tipo de sistemas e instalan sus productos en edificios de diferentes usos y localizaciones.

En cuanto a la reglamentación técnica, se observa cómo estos sistemas están desarrollados a nivel internacional, pero en España aún no se contemplan en la normativa, a pesar de que cumplen de manera eficaz con los objetivos marcados en las DE en cuanto a la consideración del clima de la zona en las soluciones que se adopten para el acondicionamiento de los edificios y el equilibrio coste-eficacia. Junto a esto, se ha observado el interés creciente en este campo de investigación a través del número de publicaciones localizadas en Scopus. En España se aprecia una falta de **reglamentación técnica** e investigación específica en materia de VN aplicada a edificación, a pesar de las condiciones climáticas favorables existentes. Al igual, no se ha identificado **desarrollo comercial** de este tipo de sistemas y dispositivos.

**Los edificios de uso educativo en el marco de la sostenibilidad.-** Este apartado centra la cuestión en los edificios de uso educativo desde el enfoque de la sostenibilidad y sus oportunidades de mejora. Se realiza un repaso por las cuestiones tratadas anteriormente desde el prisma de los edificios escolares: sostenibilidad; CAI; consumo de energía; los sistemas de ventilación y los SVN, referenciándose tanto publicaciones, manuales y normativas, como artículos y proyectos de investigación. Finalmente se han mostrado una serie de ejemplos y casos prácticos. Adicionalmente se subraya el carácter ejemplarizante de la administración, particularmente en cuanto a sus acciones encaminadas a la eficiencia energética de los edificios públicos frente a los promotores privados y el conjunto de la ciudadanía. Así mismo, actuar en los edificios públicos supone una oportunidad para reducir costes de funcionamiento y, de este modo, aumentar los fondos que puedan ser destinados a otros propósitos, con el consiguiente impacto en la comunidad educativa y en la sociedad.

En cuanto a la CAI en los espacios de uso educativo, se señala su papel fundamental en la enseñanza y el aprendizaje. A su vez ésta se vincula a la ventilación, que en ocasiones se muestra insuficiente y se asocia a diversas molestias y enfermedades. Junto a esto, ejemplos documentados con SVM, no obtienen la CAI adecuada, incurriendo además en un notable consumo de energía a pesar de utilizar dispositivos que la recuperan parcialmente en su funcionamiento.

En este escenario, la VN se evidencia como una alternativa viable, factible, sostenible y en consonancia tanto con el clima mediterráneo como con las directrices de las DE. Este tipo de edificios presenta además una serie de características específicas (ventanas amplias practicables, ventilación cruzada a pasillos, etc.) que hacen que sea sencillo implementar en su diseño estrategias de VN.

Finalmente se hace una breve reseña de otros estudios realizados en el ámbito de los edificios escolares basados en soluciones de VM, que ha constituido de algún modo el punto de partida para plantear alternativas más sostenibles que solucionen la CAI en las aulas.

De estas evidencias se desprenden los interrogantes que se resumen en el siguiente capítulo y se responden en esta tesis doctoral.





## **CAPÍTULO 2\_ HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

**MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS EDIFICIOS DE USO EDUCATIVO EN CLIMA MEDITERRÁNEO:**  
**Aplicación práctica de diseño y cálculo de Sistemas de Ventilación Natural**



## **CAPÍTULO 2.- HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

- 1. Oportunidad y retos de la investigación**
- 2. Hipótesis**
- 3. Objetivos y alcance de la investigación**

En este segundo capítulo, tras el análisis del estado de la cuestión desarrollada en el Estado del Arte donde se han identificado las oportunidades de investigación, se elabora la hipótesis tras identificar las oportunidades y los retos de la investigación y detallar los objetivos y el alcance de la misma.



## 1.- Oportunidad y retos de la investigación

Del análisis realizado en el Capítulo 1 (Estado del Arte), se desprende cómo el marco normativo actual se encuentra fuertemente influenciado por las estrategias internacionales para la reducción del consumo energético y las directrices a nivel europeo encaminadas a la mejora de la eficiencia energética de los edificios. Ambos factores influyen enormemente en el diseño de los edificios y sus instalaciones. A su vez, el diseño de éstos es un factor clave en el ciclo de vida del edificio en cuanto al coste de funcionamiento y mantenimiento y a su huella de carbono. Junto a esto, el diseño también se encuentra íntimamente relacionado con la CAI y el modo en que el usuario desempeña las actividades dentro de él. En el caso concreto de los edificios de uso educativo en Andalucía, el impacto de las nuevas normativas en el diseño, ciclo de vida, desempeño del usuario y Calidad del Ambiente Interior ha sido muy importante, especialmente en el caso del RITE 2007, lo cual se ha constatado con su aplicación práctica en edificios escolares. Los resultados obtenidos pusieron de manifiesto la necesidad de profundizar en el análisis de la viabilidad de soluciones alternativas. Es aquí donde la VN (extensamente tratada en este documento hasta el momento) se perfilaba como una alternativa viable y factible, en el marco geográfico de actuación de Andalucía. Junto a todo lo anterior presenta especial relevancia la responsabilidad de la Administración en cuanto a sus acciones, dado el carácter ejemplarizante que éstas puedan tener frente a la población.

La oportunidad de este estudio surge así por la necesidad de proporcionar, en el marco normativo actual, una respuesta factible, viable y sostenible para garantizar una adecuada CAI en los edificios escolares en Andalucía, sin impacto negativo en el ciclo de vida del edificio, ni en el desempeño y salubridad del usuario, como alternativa a los sistemas desarrollados actualmente en la normativa española. A su vez, el ámbito técnico que se cubre con los resultados obtenidos es el de las soluciones pasivas de ventilación basadas en los SVN, desarrolladas en las normativas técnicas de otros países y con un mercado internacional importante, que se encuentra sin desarrollar ni explotar actualmente en España. Estas soluciones de VN pueden además utilizarse con un doble objetivo, el de la calidad del aire y el de la refrigeración pasiva.

No se han encontrado estudios concretos, investigaciones, ni tesis doctorales que analicen la cuestión calidad del aire-ventilación natural-sostenibilidad en edificios escolares en Andalucía. Así, esta tesis viene a completar otras líneas de investigación abiertas en la Universidad de Sevilla, por un lado en el ámbito de los edificios escolares y por otro, en el de los SVN. La primera de ellas desarrollaba el análisis del confort térmico en edificios escolares en Andalucía, centrándose exclusivamente en los SVM y la segunda profundizaba en la capacidad de refrigeración de la VN en una tipología residencial. Con este trabajo que se presenta se emprende el camino del desarrollo de los SVN en los edificios escolares andaluces desde el enfoque de la CAI.

El **principal reto** que se presenta es el de ofrecer una referencia suficientemente amplia sobre la que se puedan sentar las bases que permitan desarrollar estos sistemas en la normativa sectorial, así como para que puedan ser aplicables a otro tipo de edificios no residenciales como una solución alternativa a los SVM.

El marco normativo es el de reglamentación técnica actualmente vigente en el que la definición técnica de las soluciones alternativas a la VM no se encuentra desarrollada aún. Esta situación favorece la instalación y el diseño de los SVM en los edificios ante la falta de otras opciones, ya que los técnicos no disponen de otra regulación que ofrezca pautas sencillas a la que puedan acudir fácilmente para la redacción de los proyectos, sin tener que realizar comprobaciones adicionales.

El ámbito geográfico donde se enmarca la investigación es el de Andalucía, analizándose el caso específico de los edificios de uso educativo.

Como **retos específicos** se establecen:

1. **Proporcionar una opción** a los proyectistas para diseñar sistemas de ventilación en los edificios caracterizados por ser saludables y sostenibles y de bajo impacto de huella de carbono y emisiones, en línea con las estrategias europeas de eficiencia energética en los edificios y con una relación adecuada coste-eficacia. Adicionalmente esto supone proponer un “cambio de enfoque” desde el principio del proyecto, así como abrir un nuevo marco de estudio para la enseñanza y la formación de los técnicos.



2. **Mostrar los sistemas** basados en los fundamentos de funcionamiento de la VN e identificarlos como una solución aplicable a los edificios del ámbito geográfico mediterráneo, para responder a las exigencias técnicas que marca la normativa de una manera más sostenible, eficaz y alineada con las directivas europeas de eficiencia energética al explotar las posibilidades del clima y la arquitectura bioclimática.
3. **Desarrollar una base teórica** sólidamente fundamentada sobre la que se pueda desarrollar una normativa específica de VN como complemento a la normativa técnica actualmente en vigor.
4. Realizar la difusión de los resultados de la investigación con la **transferencia del conocimiento**. Difundir y divulgar el conocimiento y los resultados para que puedan formar parte de las herramientas de diseño a disposición de los proyectistas.
5. **Abrir un campo de investigación** sobre el que desarrollar esta línea de conocimiento, que permita a Andalucía posicionarse como experta en medidas de arquitectura bioclimática y tecnologías pasivas, liderándose desde el campo de la arquitectura.
6. **Abrir un campo técnico** específico que pueda suponer una oportunidad de negocio en múltiples ámbitos además del particular de este estudio.

El conjunto de cuestiones que se han expuesto en la revisión del Estado del Arte ponen de manifiesto una oportunidad de investigación en la que comprobar la manera de garantizar la CAI en los edificios escolares de clima mediterráneo con SVN. Para dar una respuesta a esta cuestión se plantean a su vez los siguientes interrogantes:

1. **¿Cómo es la tipología de edificio?** Los edificios escolares presentan una serie de características particulares (ventanas amplias practicables, ventilación cruzada a pasillos, etc.) que hacen que sea sencillo implementar en su diseño estrategias de VN. A su vez, existen edificios de la tradición de la arquitectura escolar andaluza con soluciones de VN en las aulas, cuestión de interés a analizar para extraer conclusiones que puedan aplicarse en la actualidad. Conocer y caracterizar esta tipología es necesario para identificar las oportunidades y plantear nuevos elementos de diseño. Se da respuesta en el Capítulo 4.
2. **¿Cómo es el clima de la zona?** La aplicación de estándares, reglamentos y soluciones técnicas basadas en experiencias en regiones de clima frío no se pueden aplicar a los diseños de nuevos edificios escolares en áreas del Mediterráneo. Se ha comprobado cómo la VN funciona en edificios docentes del Reino Unido y otras localizaciones, por lo tanto más interesante aún sería en clima mediterráneo, cuestión que habría que estudiar desde este enfoque. Se da respuesta en el Capítulo 4.
3. **¿Cuál es el consumo, el coste y la efectividad de un SVM?** Los resultados obtenidos en un estudio teórico anterior se posicionaban en contra de los principios de las DE que promueven la mejora en la eficiencia energética de los edificios, ya que se obtenían aumentos de los consumos de energía con un importante incremento asociado de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, en el estudio éste resultado se justificaba con el hecho de que se controlaba la CAI mediante un sistema de ventilación mecánica que introducía aire exterior filtrado, por lo que “en teoría” se estaba mejorando la CAI, aún a costa de un mayor consumo de energía. A estos mayores consumos (y gastos asociados), había que sumar los mayores costes de inversión inicial, así como los debidos al riguroso mantenimiento que debía realizarse con estos sistemas mecánicos. Además, en ningún momento se consideraba el riesgo de SBS que podría asociarse a un deficiente mantenimiento de los sistemas. Todo lo cual es necesario cuantificarlo en la realidad. Se da respuesta en el Capítulo 4.
4. **¿Cómo es la CAI en los edificios escolares del ámbito de estudio?** Debe tenerse en cuenta que la ventilación de los espacios de uso docente es un aspecto de especial relevancia, porque de ellos depende la CAI, que se relaciona con el rendimiento académico. Diversos estudios determinan la influencia que tiene el propio edificio y la actividad de los ocupantes en la producción de CO<sub>2</sub> y los contaminantes, subrayando la incidencia del factor de ser espacios de alta densidad de ocupación. Conocer la situación de partida de la CAI

es fundamental para plantear propuestas para su mejora. Se da respuesta con los datos obtenidos en la primera parte del Plan experimental recogido en el Capítulo 5.

5. **¿Cómo es su estructura de consumo de energía?** Desde el punto de vista de la sostenibilidad y la eficiencia energética de los edificios, mejorar el desempeño energético de los sistemas de ventilación es un factor de peso, dado el mayor consumo potencial que tienen dentro del conjunto de sistemas activos del edificio, especialmente en espacios de elevada densidad de ocupación como las aulas. Así, la vía para llegar a diseñar edificios de bajo consumo de energía o de consumo de energía casi nulo debe ser diferente, por lo que se hace necesario el desarrollo de soluciones y estándares específicos que garanticen las condiciones térmicas y de calidad del aire, evitando a su vez problemas de sobrecalentamiento del espacio interior. Para ello, debemos partir del conocimiento de la estructura de consumo de la tipología de edificio que se analiza en el ámbito geográfico concreto. Se da respuesta con los datos obtenidos en la primera parte del Plan experimental recogido en el Capítulo 5.
6. **¿Cómo pueden diseñarse los SVN? ¿Cómo es el confort térmico con un SVN?** Al igual que en otro tipo de edificios, como los de oficinas, los SVN aún no se aplican ampliamente porque hay información limitada disponible sobre el diseño y su efecto en el confort térmico y la CAI, siendo esto una cuestión a investigar. Adicionalmente, se ha comprobado cómo la normativa de diferentes países prescribe como solución preferente o al menos considera el uso de SVN en el diseño de los edificios escolares, por lo que el estudio debe plantearse desde el análisis y especificaciones de las mismas. Se da respuesta en el Capítulo 4 en el aspecto de las bases de diseño, en el Capítulo 5 en cuanto a edificios existentes y en el Capítulo 6 en cuanto a un edificio test diseñado con un Sistema de Ventilación Natural Inteligente (SVNI).
7. **¿Cuál es el consumo, el coste y la efectividad de un SVN?** Se da respuesta en los Capítulos 5 y 6.

## 2.- Hipótesis

La presente tesis doctoral se ha desarrollado para responder a las cuestiones enunciadas en el apartado anterior “oportunidad y retos de la investigación”. Según las evidencias identificadas, la tecnología de los SVN puede utilizarse en el diseño de los edificios de uso educativo de nueva construcción en clima mediterráneo, como herramienta para mejorar la sostenibilidad y garantizar la CAI de los espacios de elevada densidad de ocupación (aulas), con un muy bajo o nulo consumo de energía. Utilizando estos sistemas, se reduce la emisión de CO<sub>2</sub> del edificio en su funcionamiento, incrementándose la sostenibilidad a lo largo de su vida útil. Otras ventajas del sistema son la reducción de costes de inversión inicial, de funcionamiento y de mantenimiento, así como la mejora de la salubridad de los espacios. El marco técnico es el de la normativa actual, con elevados requerimientos de hermeticidad para los edificios, considerándose tanto española como la internacional para los aspectos no regulados en la nacional. El ámbito geográfico de estudio se centra en la región de Andalucía, en el sur de España, como representativa del clima Mediterráneo europeo.

Lo anterior se resume en 10 puntos fundamentales en los que se ha estructurado la hipótesis según se recoge en la Tabla 2.1. Estos constituyen afirmaciones que se verifican a lo largo del documento.

**Tabla 2. 1.** Estructura de la hipótesis

<b>1. SISTEMAS DE VENTILACIÓN</b>	I. La renovación del aire de los espacios interiores para garantizar la CAI puede realizarse por medios mecánicos y naturales.
<b>2. CUMPLIMIENTO DE LAS EXIGENCIAS TÉCNICAS</b>	II. Los SVN en los edificios cumplen con las exigencias técnicas marcadas por la normativa en vigor, constituyendo una solución alternativa que mejora los resultados y las prestaciones que se obtienen mediante la mera aplicación de las soluciones desarrolladas en las Instrucciones Técnicas del RITE actuales.
	III. Teniendo en cuenta el calendario y el régimen de uso actual de los edificios escolares en Andalucía, el rango de temperaturas exteriores durante el periodo y el horario lectivos en la zona de clima mediterráneo hace viable la utilización de SVN tanto en invierno como en verano.
	IV. La incidencia en el confort térmico en invierno se resuelve con un adecuado diseño de las admisiones de aire.
	V. La CAE de las zonas donde se implantan los edificios escolares es buena, por lo que no es necesario el filtrado del aire de admisión si no es porque esté siendo introducido en el espacio a través de una UTA.
<b>3. CONTAMINANTES</b>	VI. La principal fuente de emisiones en los espacios de uso docente es el propio ocupante, siendo el principal elemento a controlar el CO <sub>2</sub> producido por la emisión de bioefluentes, que aunque no es un contaminante en sí mismo, sí es un buen indicador de la CAI.
	VII. El nivel de contaminantes de los espacios de uso docente se encuentra por debajo de los límites establecidos por la OMS, ya que se limita su producción mediante el control de las fuentes en su origen, utilizándose materiales no emisivos tanto en los elementos constructivos como en el mobiliario.
<b>4. BALANCE ENERGÉTICO</b>	VIII. La ventilación supone un porcentaje importante del total dentro de la estructura de la demanda y el consumo de energía en los centros educativos andaluces.
	IX. La utilización de SVM en centros educativos tiene un importante impacto en el consumo de energía y producción de emisiones de CO <sub>2</sub> , aun cuando se dispongan recuperadores de calor.
	X. Un edificio escolar funcionando con VN proporciona una adecuada CAI con menor consumo de energía y emisiones de CO <sub>2</sub> que el mismo edificio, en las mismas condiciones de configuración, localización, etc... y funcionando con SVM.

### 3.- Objetivos y alcance de la investigación

El **objetivo principal** de esta tesis es contribuir al conocimiento de los sistemas y estrategias pasivas que se pueden utilizar en el diseño de los edificios para garantizar las prestaciones que deben ofrecer, mejorando su sostenibilidad mediante la reducción del consumo de energía. Las estrategias pasivas, alineadas con los principios de la arquitectura bioclimática, permiten diseñar los edificios de manera consciente en relación al clima y a las condiciones de la ubicación territorial y geográfica. Esto permite hacerlos menos dependientes de posibles fluctuaciones en el suministro o el coste de la energía, así como más respetuosos con los recursos disponibles y su forma de utilización.

Dentro del conjunto de temas que se pueden abordar desde el enfoque de la sostenibilidad en los edificios, se profundiza en esta tesis en aquél en el que se han identificado tanto una falta de conocimiento y desarrollo normativo como un gran potencial de aplicación práctica en la zona geográfica de estudio. Así mismo, su mejor desempeño lleva asociadas otras posibles medidas, que pueden ser objeto de futuras investigaciones.

La contribución de esta tesis se materializa en el desarrollo de una base teórica y experimental para incorporar los conceptos de funcionamiento de la VN, sus estrategias de diseño y sistemas específicos, en los edificios escolares de la zona mediterránea, con el objetivo de reducir su huella de carbono y mejorar su sostenibilidad.

Entre los **objetivos específicos** se encuentran:

1. **Proporcionar soluciones específicas** para el sur de Europa y el clima mediterráneo, adecuadas a sus características climatológicas que no procedan de estudios heredados de otros climas, centradas en la definición de estándares específicos para mejorar la Calidad del Ambiente Interior en los edificios escolares, que garanticen a la vez las condiciones térmicas y de calidad del aire.
2. **Identificar y proponer** las tecnologías de VN como **nuevas estrategias**, no desarrolladas aún en la normativa española, para la mejora de la sostenibilidad de los edificios, a través de un modelo diseñado y calculado con herramientas de cálculo y simulación, aplicado al caso concreto del uso educativo.
3. **Aportar soluciones** para garantizar las exigencias técnicas que establece la normativa en relación a la reducción de la huella de carbono de los edificios (consumos de energía y emisiones de CO<sub>2</sub>) y el diseño de edificios de consumo de energía casi nulo, junto con los aspectos de salubridad y calidad del aire interior, teniendo en cuenta todos los parámetros relacionados con la vida útil de los edificios, la inversión inicial, los gastos de mantenimiento, el origen de la financiación...etc y teniendo en cuenta el carácter ejemplarizante de las administraciones públicas.
4. **Mostrar la tipología de edificio** de uso educativo y sus especificidades, analizando sus características constructivas, particularidades de mantenimiento, patrón de funcionamiento y régimen de uso a lo largo de su vida útil.
5. **Potenciar la incorporación de soluciones de diseño pasivo** en los edificios escolares andaluces para mejorar la CAI y como refrigeración pasiva, siguiendo las pautas de las DE en cuanto al diseño de los edificios en función de su localización y el clima específico.
6. **Identificar los principales parámetros del diseño** que respondan a las necesidades del caso sobre el que se implementa.
7. **Desarrollar un modelo de aplicación práctica** basado en condicionantes reales que lo hagan viable, factible y sostenible, desde el enfoque del carácter ejemplarizante de la administración en sus acciones, como muestra a otros promotores públicos y privados y a los propios usuarios en cuanto a estrategias pasivas y sostenibles.

En cuanto a su **alcance**, la investigación se desarrolla en el marco del parque público andaluz de edificios educativos de enseñanza no universitaria, por ser el ámbito de competencia de la Consejería de Educación. A su vez, es de interés la proyección internacional de los resultados obtenidos a nivel regional, a los países del ámbito mediterráneo, teniendo en cuenta que el número de centros escolares existentes entre Italia, Grecia España y Francia se encuentra en el entorno de los 87.000. Finalmente, la utilización de esta tecnología también puede ser aplicable a otro tipo de edificios tales como los destinados a oficinas, uso comercial, asistencial, recreativo, etc, tras su propio análisis, dadas las diferentes características de los edificios, régimen de uso y nivel de demanda energética.

## **CAPÍTULO 3\_ METODOLOGÍA**

**MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS EDIFICIOS DE USO EDUCATIVO EN CLIMA MEDITERRÁNEO:**  
**Aplicación práctica de diseño y cálculo de Sistemas de Ventilación Natural**





## **CAPÍTULO 3.- METODOLOGÍA**

- 1. Metodología**
- 2. Sistemas y recursos**

En este capítulo 3 se expone en un primer apartado la metodología seguida en la investigación y en un segundo los sistemas y equipos y recursos y medios utilizados.



## 1.- Metodología

La investigación desarrollada ha sido mixta, cualitativa y cuantitativa, con la finalidad de obtener la información más completa y profunda posible. La investigación cualitativa ha proporcionado contexto y la investigación cuantitativa ha proporcionado evidencia y predicciones. La primera se ha aplicado como técnica descriptiva mediante la recopilación de datos utilizados para identificar detalles que ayuden a explicar el funcionamiento del edificio y el comportamiento de sus usuarios. Esta parte de la investigación nos ha ayudado a comprender el qué, por qué, cómo o de qué manera. Se ha desarrollado aplicando métodos de recogida de información basada en la observación de funcionamiento, de comportamientos y de evidencias. La parte cuantitativa de la investigación ha buscado cuantificar el caso y la tipología. Los datos obtenidos son fundamentalmente numéricos y se han utilizado para diseñar el modelo de cálculo y confirmar la hipótesis.

Tras la identificación preliminar del objeto de la investigación se desarrolla una metodología para estructurar el análisis. En ella se identifican 4 etapas, subdivididas a su vez en fases que agrupan distintos conjuntos de tareas, componiéndose la metodología de 9 fases. El conjunto de actividades y acciones se han organizado según el esquema que se muestra en la Tabla 3.1.

**Tabla 3. 1.** Estructura metodológica de la tesis

<b>ETAPA 1-Base teórica</b>	1. Estado del arte	cualitativa/cuantitativa
	2. Caracterización de la tipología de edificio y su entorno	
	3. Hipótesis	hipótesis
<b>ETAPA 2-Obtención de datos experimentales</b>	4. PLAN EXPERIMENTAL 1ª PARTE: condiciones de funcionamiento	cuantitativa
<b>ETAPA 3-Modelo de cálculo y validación</b>	5. Modelo de cálculo	
	6. Resultados de cálculo y diseño del sistema	
	7. PLAN EXPERIMENTAL 2ª PARTE: comprobación de funcionamiento del modelo en el edificio demostrador	conclusiones
<b>ETAPA 4-Transferencia de conocimiento</b>	8. Análisis, discusión y conclusiones finales	
	9. Transferencia de conocimiento y resultados de investigación	TRI

Cada una de ellas se ha desarrollado como se describe detalladamente a continuación:

### ETAPA 1- base teórica: i) estado del arte; ii) caracterización de la tipología; iii) Hipótesis

Sobre esta base teórica se sustenta la hipótesis en la que se centra la investigación. En esta etapa se lleva a cabo la recopilación y el análisis de los datos que conforman la base teórica. En la primera fase se recaba la información para configurar el estado del arte, centrándose en el marco teórico general, dentro del que se tratan otros aspectos específicos tales como el del desarrollo sostenible, la sostenibilidad en los edificios, la eficiencia energética, la calidad del ambiente interior y los SVN. Todos estos temas se analizan posteriormente desde el enfoque del uso educativo. A continuación se analiza la tipología de edificio sobre el que se investiga, identificando sus especificidades, las características principales de funcionamiento y organización, las condiciones programáticas y dimensionales, los aspectos más representativos de diseño y constructivos, el ámbito geográfico y climático de la zona de análisis, el volumen del conjunto de los edificios y su impacto en el medio. Con esos datos se lleva a cabo la caracterización del problema y la definición de la necesidad detectada para la que se busca una solución, planteando la hipótesis en la fase 3 de esta etapa. También se identifican los parámetros normativos y los rangos y los valores límite de diseño y cálculo.

El esquema de los medios utilizados en esta primera etapa se resume en la Fig. 3.1.



Fig.3.1 Esquema de los medios para el desarrollo de la Etapa 1.

El resumen de cuestiones estudiadas en esta etapa se recoge en el Capítulo 1 y Capítulo 4

### ETAPA 2- Obtención de datos experimentales: i) Plan experimental 1ª parte

En ésta se incluye una primera parte del plan experimental, orientada fundamentalmente a la obtención de datos concretos para desarrollar un modelo de cálculo. Estos datos también sirven para el diseño y para dar respuesta a los requerimientos normativos. Se desarrolla en dos apartados complementarios. El primero tiene el objetivo de conocer el impacto del edificio en su funcionamiento en cuanto al consumo de energía y su huella de carbono así como la CAI (calidad del aire y condiciones de confort interior). Para ello, una parte de los datos se obtienen con simulaciones numéricas y otra mediante la monitorización de distintos edificios. En el segundo apartado, se realizan ensayos específicos en dos edificios existentes, orientados a analizar comparativamente el funcionamiento de un SVN y un SVM en aulas.

El resultado de esta etapa se recoge en el Capítulo 5.

### ETAPA 3- Modelo de cálculo y validación: i) modelo de cálculo; ii) resultados de cálculo y diseño del sistema; iii) Plan experimental 2ª parte.

El objetivo de esta etapa es definir un modelo experimental sobre el que validar la hipótesis. En la fase 5 se elabora el modelo de cálculo, con el que se realizan los cálculos específicos mediante simulaciones en un edificio prototipo, para obtener conclusiones que puedan ser extrapoladas al diseño. En la fase 6 se analizan y discuten los resultados obtenidos, para trasladar a continuación el modelo teórico a un modelo real estandarizado. Este modelo estándar se desarrolla para poder implementarse en el aula de cualquier centro educativo, independientemente de su localización. Su diseño se realiza atendiendo a cuestiones técnicas, constructivas, de funcionamiento y mantenimiento y teniendo en cuenta el marco geográfico de actuación.

A continuación, en la fase 7, se desarrolla la segunda parte del plan experimental. El objetivo de esta fase es validar la hipótesis y el diseño del modelo teórico calculado sobre un edificio real que se utiliza como edificio test. En éste se implanta el SVN diseñado, que se denomina Sistema de Ventilación Natural Inteligente (SVNI). Este modelo de instalación se utiliza como demostrador sobre el que se realizan un conjunto de pruebas y ensayos, cotejándose los

resultados con las estimaciones obtenidas previamente en los cálculos. Esta etapa se cierra con la fase 8 en la que se resumen el conjunto de conclusiones finales que se han obtenido del proceso de investigación.

El resultado de esta etapa se recoge en el resto de capítulos (Capítulos 5 al Capítulo 8)

El esquema del proceso de investigación siguiendo la metodología se representa gráficamente en la Fig.3.2

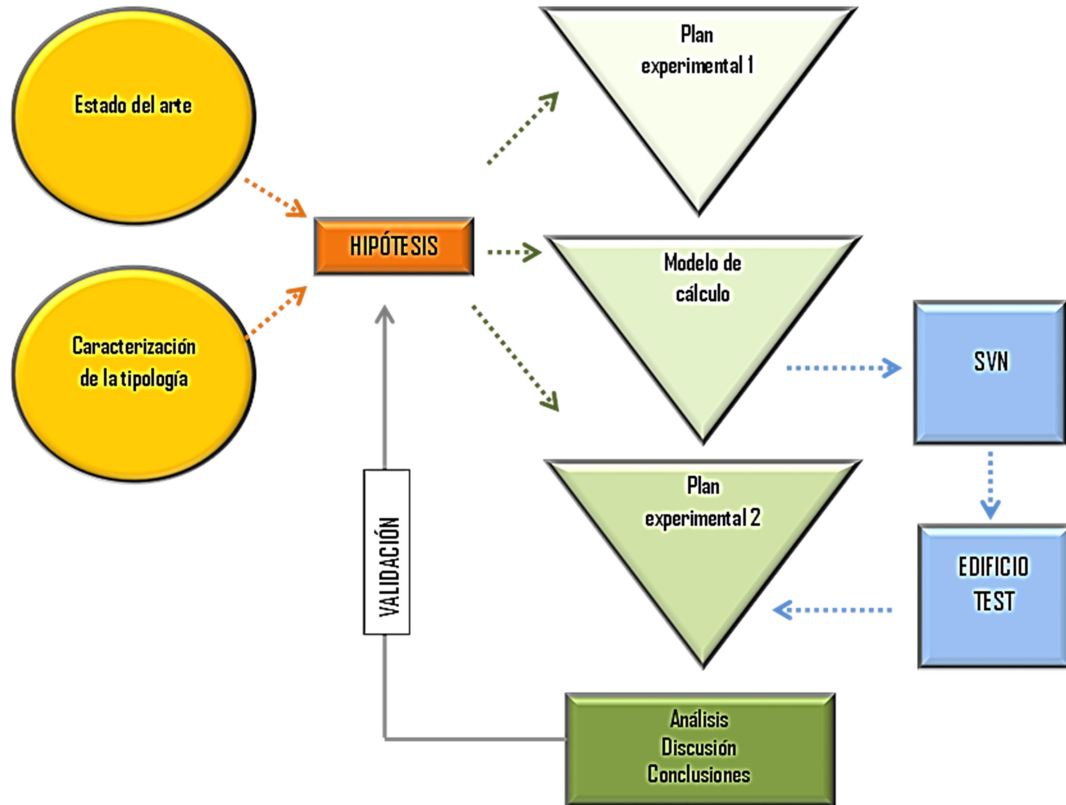


Fig.3.2 Esquema del proceso de investigación desarrollado siguiendo la metodología

#### ETAPA 4-Transferencia de conocimiento

Aunque esta etapa se describe como independiente, se desarrolla transversalmente con las demás, realizándose publicaciones y aportaciones al campo científico mediante presentaciones y asistencia a cursos, congresos y jornadas.

El contenido de esta etapa se recoge en el Capítulo 9.



## 2.- Sistemas y recursos

Para el desarrollo de los distintos apartados de la metodología se han utilizado una combinación de recursos y sistemas que han permitido la investigación mixta cualitativa y cuantitativa

### SISTEMAS

Los sistemas, equipos de medida y dispositivos utilizados son los siguientes:

#### i. Equipos de medida

- Equipos portátiles de medida en continuo (utilizados en interior y exterior)

Equipo	Intervalo de medida	Variables	Rango de medida
<b>Delta OHM HD 21ABE17</b>	2 minutos	CO <sub>2</sub> dióxido de carbono (ppm)	0...5000 ppm
		CO monóxido de carbono (ppm)	0...500 ppm
		Presión atmosférica (Pa)	750...1100 hPa
		Humedad relativa (%)	0...100 % RH
		Temperatura (°C)	-20...+60 °C
<b>Optical Particle Sizer OPS 3330</b>	2 minutos	Número y tamaño de partículas (en 10 canales de medida)	0.3 – 10 µm
<b>TVOC 103</b>	2 minutos	TVOC (ppb)	5 a 20,000 ppb

- Equipos fijos de medida en continuo

Equipo	Intervalo de medida	Variables	Rango de medida
<b>Data Logger HOBO U12-013</b> con sensores incorporados temperatura/humedad relativa <b>Sensor CO<sub>2</sub> CWE</b> conectado a HOBO U12-013 24 V Fuente de alimentación sensor (Equipo interior)	5 minutos	Temperatura / humedad relativa/ CO <sub>2</sub>	-20...70°C 5%...95% RH 0-2000ppm
<b>Data Logger HOBO U23-001</b> con sensores incorporados temperatura/humedad relativa (Equipo exterior)	5 minutos	Temperatura / humedad relativa	-40°...70°C 0...100% RH
<b>Data Logger HOBO U12-008</b> con canales exteriores para sensor de CO <sub>2</sub> <b>Sensor CO<sub>2</sub> CWE</b> con protección a la intemperie conectado a HOBO U12-008 24 V Fuente alimentación sensor Protección intemperie de la Fuente de alimentación y del sensor (Equipo exterior)	5 minutos	CO <sub>2</sub>	0-2000ppm

- Sensores individuales de medida en continuo y KNX del edificio test

Equipo	Intervalo de medida	Variables	Rango de medida
<b>Sensor de techo Sewi KNX AQS/TH-D.</b> Configuración Software ETC de KNX (Elsner elektronik)	2/5 minutos	Temperatura / humedad relativa/ Presión/ CO <sub>2</sub>	-10...+50°C max. 95% RH 0-2000ppm
<b>HomeLYnk</b> Logic controller (servidor web Schneider Electric) 24 v Con aplicación de visualización web en diferentes plataformas (PC, Tablet, Smartphone)			

#### ii. Toma de muestras

- Dispositivos passive samplers (para conocer los niveles ambientales de compuestos orgánicos volátiles y formaldehidos)

Equipo	Intervalo de muestreo	Compuestos	Método de análisis
VOC adsorbent cartridges (Radial passive sampler RAD145)	5 días (muestreo difusivo)	Benzene, Trichloroethylene, Toluene, Tetrachloroethylene, Ethylbenzene, m+p-xylene, Styrene, o-xylene, Alpha-pinene, 1,4-dichlorobenzene	Thermal desorption HRGC-MS
Aldehyde adsorbent cartridges (Radial passive sampler RAD165)	5 días (muestreo difusivo)	Formaldehyde, Acetaldehyde, Acrolein, Propanal, Butanal, Benzaldehyde, Isopentanal, Pentanal, Hexanal	Solvent extraction (acetonitrile) HPLC-UV

HRGC: cromatografía de gases de alta resolución. MS: espectrometría de masas. HPLC: cromatografía líquida de alto rendimiento. UV: ultravioleta.

- Ensayos de laboratorio: Los análisis fueron realizados por el laboratorio ICSM, utilizando cartuchos de Sigma-Aldrich.

### iii. N° de centros ensayados

- Dentro del conjunto de centros que componen la muestra analizada en el proyecto ClimAct, 9 de ellos corresponden al parque andaluz. Esta muestra ha sido seleccionada atendiendo a criterios de diversidad en cuanto a épocas y estándares constructivos. A su vez la selección trata de ser representativa en cuanto al grupo de municipios, densidad de población y mayor número de centros.  
Los datos analizados han sido tanto generalistas en cuanto a las condiciones físicas de los edificios y su entorno, como detallados en cuanto a las condiciones de operación (auditoría global del centro, CAI y caracterización del consumo energético.)  
Las muestras se han tomado en la época en que las condiciones son más representativas del total del calendario lectivo.  
La muestra analizada en el marco del proyecto ClimAct se compone de un total de 39 centros, auditados en Portugal (9), España (13), Francia (9) y Gibraltar (8).
- Adicionalmente, se estudian dos centros en los que se analiza el funcionamiento de los sistemas de ventilación (natural y mecánica) con medidas en continuo.
- Finalmente, se ha llevado a cabo el estudio de un centro piloto (edificio test). En el mismo se han realizado mediciones de las condiciones operacionales y de CAI en todas las épocas climáticas representativas (fría-cálida-época intermedia), acorde con la estructura del curso lectivo (septiembre-junio).

### iv. Consulta de mercado

Consulta sobre el tipo, precio y viabilidad de adquisición de dispositivos, sistemas y soluciones de ventilación natural:

- Windomaster <https://www.schueco.com/web2/es>
- Monodraught <https://www.monodraught.com/>
- Velux <https://www.velux.es/>
- Schüco <https://www.schueco.com/web2/es>

## RECURSOS

### i. Recursos de la US

- Consulta bibliográfica en las bibliotecas
- Asistencia “on line” para búsqueda de manuales y datos
- Catálogo Fama
- Cursos de formación:
  - Workshops de ICE (Instituto de Ciencias de la educación de la US) de escritura de artículos científicos en inglés y presentaciones académicas. Desarrollado en el DAD;
  - Cursos y jornadas formativas relacionadas con el ámbito del trabajo de investigación: búsquedas bibliográficas, utilización de organizadores tipo Mendeley Desarrollado en el DAD;

- Guías de apoyo a la investigación de la US [https://bib.us.es/estudia\\_e\\_investiga/guias/investigacion](https://bib.us.es/estudia_e_investiga/guias/investigacion)

**ii. Recursos informáticos**

- Herramientas informáticas:
  - Autocad,
  - Acrobat
  - Excel,
  - Word
  - Powerpoint
  - Google (google scholar, google maps)
- Aplicaciones informáticas de cálculo y diseño:
  - Designbuilder
  - Lider
  - Visol
  - Excel

**iii. Recursos de informática científica**

- Bases de datos científicas y catálogos (Scopus)
- Alertas de citas y publicaciones
- Gestores de referencias bibliográficas (Mendeley)

**iv. Recursos para la divulgación**

- Asistencia a congresos y jornadas (traslados, inscripción, etc...)
- Publicación en revistas científicas

**v. Recursos de la administración:** acceso a proyectos, estudios y ensayos, acceso a los centros educativos

**vi. Otros**

- Cámara digital Canon EOS
- Ordenador portátil
- Ordenador de sobremesa
- Teléfono

## **CAPÍTULO 4\_ LA ARQUITECTURA ESCOLAR EN ANDALUCÍA (Caracterización del modelo de la investigación)**

**MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS EDIFICIOS DE USO EDUCATIVO EN CLIMA MEDITERRÁNEO:  
Aplicación práctica de diseño y cálculo de Sistemas de Ventilación Natural**



## **CAPÍTULO 4.- LA ARQUITECTURA ESCOLAR EN ANDALUCÍA (Caracterización del modelo de la investigación)**

- 1. Tipología de edificio demostrador**
- 2. Ámbito geográfico y climático**
- 3. Caracterización de la necesidad**
- 4. Parámetros normativos**

En este Capítulo 4 se realiza la caracterización de las condiciones que definen el edificio modelo de la investigación. Estas se abordan desde un enfoque amplio, analizando tanto el edificio contenedor y el entorno en el que se inserta, como la forma de uso y funcionamiento, el tipo de usuario y las actividades que se realizan.

Se estructura en 4 apartados en los que se analizan los siguientes aspectos:

- i. En primer lugar se detalla la tipología de edificio considerando su especificidad, condiciones de diseño y constructivas, las de funcionamiento y las de uso y mantenimiento de este tipo de edificios.
- ii. En segundo lugar se estudia el ámbito geográfico y climático en el que se enmarca la investigación, el cual presenta también unas condiciones diferenciadas de otros climas europeos.
- iii. A continuación se analizan los elementos que han dado lugar a la necesidad de investigar en el tema que se aborda en la presente tesis.
- iv. Por último se identifican los diferentes parámetros normativos que afectan al diseño de la tipología de edificios que se someten a estudio.





## 1.- Tipología de edificio demostrador

### Resumen

En este apartado se analiza en detalle la tipología de edificio de uso educativo, teniendo en cuenta los aspectos que lo singularizan, diferenciándolo de otro tipo de edificios destinados a otros usos. Estos aspectos se desarrollan en tres apartados que abordan las condiciones de diseño y constructivas, las de funcionamiento y las de uso y mantenimiento. El conocimiento y la reflexión sobre estas características son primordiales a la hora de enfrentarse al diseño del edificio, ya que la aplicación de los estándares que habitualmente se emplean en otro tipo de usos puede derivar en un inadecuado funcionamiento de los mismos, una complejidad innecesaria en el mantenimiento e incluso afectar a la salubridad de los espacios y bienestar de los ocupantes.

Parte de los resultados y datos recogidos en este capítulo se han presentado en:

- “Natural Ventilation Systems to enhance sustainability in buildings: a review towards Zero Energy Buildings in schools”. International conference on advances in energy systems and environmental engineering (ASEE17). Wroclaw University of Science and Technology (Poland). The University of New Mexico (USA). Brunel University London (UK). <http://www.asee17.wis.pwr.edu.pl/>

Y se han encuentran publicados en:

- “Natural Ventilation Systems to enhance sustainability in buildings: a review towards Zero Energy Buildings in schools” (Gil-Baez, Barrios-Padura, & Molina-Huelva, 2017). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172200053>

### 1.- Tipología de edificio demostrador

1.1	Condiciones de diseño y constructivas.....	143
1.1.1	Aspectos de diseño específicos .....	143
1.1.2	Condiciones del entorno inmediato de implantación de la edificación.....	145
1.1.3	Tipos de centro .....	143
1.1.4	Tipos de espacios .....	146
1.1.5	Esquema funcional .....	146
1.1.6	Calidad del Ambiente Interior.....	147
1.2	Condiciones de funcionamiento.....	151
1.2.1	Régimen de uso.....	151
1.2.2	Condiciones de ocupación.....	152
1.2.3	Tipo de usuario .....	153
1.2.4	Densidad de ocupación .....	153
1.3	Condiciones de uso y mantenimiento.....	154

## 1.1 Condiciones de diseño y constructivas

El sector de los edificios escolares es único en el conjunto de la edificación, ya que presenta tipologías específicas e infraestructuras singulares. A su vez, los usuarios y los patrones de funcionamiento de estos edificios, así como la utilización de los recursos energéticos que le son propios, difieren sustancialmente de otro tipo de usos. A pesar de ello, se aprecia un cierto desconocimiento generalizado de este aspecto. Así, es habitual que en la normativa se relacionen o agrupen los distintos usos de la edificación como residencial y “otros usos”, incluyendo los edificios educativos en este segundo apartado junto con otro tipo de edificios que poco tienen que ver. En el caso del CTE (Ministerio de vivienda, 2006), en relación a la Calidad del Aire, para justificar el cumplimiento del DBHS (Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Ministerio de Fomento, n.d.) remite al RITE (Ministerio de la Presidencia, 2007) para todo uso no residencial. Sin embargo, la configuración arquitectónica, así como el uso y funcionamiento de un edificio escolar son absolutamente diferentes a los de “otros usos” con los que habitualmente se le relaciona como pueden ser el hospitalario, comercial, oficinas, etc...

Es por tanto imprescindible, antes de determinar cómo se deben garantizar las prestaciones de la edificación, conocer cómo es el edificio sobre el que se pretenden parametrizar determinados aspectos. Para ello, se analizan los siguientes puntos: i) Aspectos de diseño específicos; ii) Condiciones del entorno inmediato de implantación de la edificación; iii) Tipos de centro; iv) Tipos de espacios; v) Esquema funcional y vi) Calidad del ambiente interior: Confort Térmico y CAI.

Tal como se recoge en la normativa sectorial específica (Consejería de Educación y Ciencia. Junta de Andalucía, Consejería de Educación y Ciencia. Junta de Andalucía. Spain, & Consejería de Educación y Ciencia. Junta de Andalucía, 2003) que es de aplicación a los nuevos centros públicos que se proyectan y construyen, las bases fundamentales que deben presidir el diseño de este tipo de edificio son la durabilidad y la robustez de las edificaciones y que tengan además un requerimiento mínimo de mantenimiento, debiendo tenerse siempre presente la mejor utilización de los fondos públicos.

### 1.1.1 Aspectos de diseño específicos

Otros aspectos fundamentales para el diseño, que se recogen en la normativa sectorial (NNDD (Consejería de Educación y Ciencia. Junta de Andalucía et al., 2003)), son los siguientes:

Integración arquitectura y naturaleza, patrimonio cultural: “En Andalucía, donde tradicionalmente en el tratamiento general del espacio construido han sido tan frecuente los ejemplos de buen uso de los elementos de la naturaleza, como el agua y la vegetación, debemos ser sensibles a todos aquellos recursos que han hecho de la integración de arquitectura y naturaleza una valiosa aportación al patrimonio cultural andaluz”

Arquitectura y entorno (condiciones bioclimáticas): “Se tendrá en cuenta la integración de los Centros en su entorno urbano y su adecuación a las condiciones bioclimáticas del lugar.”

Condiciones de habitabilidad: “La proporción entre superficie en planta y longitud de fachada debe llevarse a su valor más alto posible, con la limitación que resulta de procurar a la vez unas buenas condiciones de iluminación natural y ventilación.”

Eficiencia en los recursos: “En los Centros educativos se promoverán las instalaciones de energías renovables.”

Educación ambiental: “Los espacios exteriores anejos a los centros docentes suponen una oportunidad de favorecer el conocimiento de las especies botánicas. Por ello, es recomendable la introducción de especies vegetales, dedicando una atención especial hacia aquellas especies autóctonas o de mayor interés didáctico”. “Se proyectará el ajardinamiento de las zonas de acceso para una mayor dignificación del conjunto”.

### 1.1.2 Tipos de centro

Según el esquema del sistema educativo español (Jefatura del Estado, 2006, 2013), entre las enseñanzas de régimen general se encuentran las de infantil, primaria y secundaria, siendo enseñanzas básicas las correspondientes a los niveles de educación primaria y secundaria obligatoria. Las enseñanzas básicas son obligatorias y gratuitas para todas las personas. La etapa educativa de educación infantil tiene carácter voluntario, siendo gratuito el segundo ciclo según la de educación de Andalucía (Jefatura del Estado, 2013). Los centros docentes se regulan en el Título IV de la Ley Orgánica 2/2006 (Jefatura del Estado, 2006), modificada por la Ley Orgánica 8/2013 (Jefatura del Estado, 2013). Ésta establece la denominación de escuelas para los centros

educativos de educación infantil, colegios para los de primaria, colegios de educación infantil y primaria para los que ofrezcan ambas enseñanzas e institutos los que ofrecen educación secundaria obligatoria, bachillerato y formación profesional. En cuanto a los centros públicos que ofrezcan enseñanzas agrupadas de manera distinta a las anteriores, establece que corresponderá a las Administraciones educativas determinar su denominación.

Las Normas de Diseño y Constructivas aprobadas por Orden de la Consejería de Educación y Ciencia del año 2003 (Consejería de Educación y Ciencia. Junta de Andalucía et al., 2003), recogen en su Anexo I los Programas de Necesidades para los diferentes tipos de centros docentes públicos, en virtud de la tipología de Centros Educativos desarrollada en el Mapa de Enseñanzas y red de Centros de Andalucía y según la ordenación del Sistema Educativo, desarrollando los correspondientes a los tipos de centro recogidas en la Tabla 4.1.

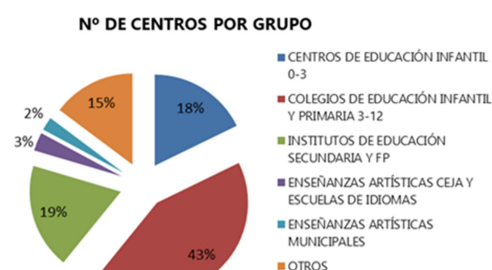
**Tabla 4.1.** Enseñanzas de régimen general (CEJA, n.d.)

TIPO DE CENTRO EDUCATIVO	MODELO
Centros de Educación Infantil	A
Centros de Educación primaria	B
Centros de Educación Infantil y Primaria	C
Centros de Educación Secundaria Obligatoria	D
Centros de Educación Secundaria Obligatoria de primer ciclo	SD
Centros Incompletos	I
Centros de Educación Secundaria Completa	sin letra que designe el tipo)

Los centros tipo A se denominan Escuelas, los B y C son Colegios, el tipo D y Secundaria Completa son Institutos. Los SD se denominan Colegios de Educación Infantil y Primaria y primer ciclo de secundaria. No existe un modelo que desarrolle en un único edificio las enseñanzas completas obligatorias en todos sus ciclos. En su caso, el tipo SD, suele ubicarse en zonas rurales donde los alumnos de secundaria deben desplazarse a otro municipio para asistir a la enseñanza secundaria, en los que, por cuestiones de edad, se mantiene el primer ciclo en el mismo colegio de la localidad. Por tanto, dentro del uso docente hay diferentes tipos de edificios en función de su organización, así como diferentes tipos de espacios, que deberán dar respuesta a las necesidades docentes dependiendo del tipo de enseñanza.

El parque público de centros de educación no universitaria actual en Andalucía se compone de 4.673 centros educativos, de distintos niveles y tipos y se clasifican del siguiente modo (datos según web CEJA a 28.04.2019 (CEJA, n.d.)):

TIPO DE CENTRO	nº
CENTRO ESPECÍFICO DE EDUCACIÓN ESPECIAL	15
CENTRO PÚBLICO INTEGRADO DE FORMACIÓN PROFESIONAL	5
COLEGIO DE EDUCACIÓN INFANTIL Y PRIMARIA	1843
COLEGIO DE EDUCACIÓN PRIMARIA	60
COLEGIO PÚBLICO RURAL	109
ENSEÑANZAS ARTÍSTICAS CEJA (CONSERVATORIOS)	102
ENSEÑANZAS ARTÍSTICAS MUNICIPALES (ESCUELAS MUNICIPAL)	111
ESCUELAS INFANTILES	831
ESCUELAS DE IDIOMAS	51
INSTITUTOS	871
OTROS	675
total	4673



**Fig.4.1.** Estructura del parque público andaluz de centros educativos de enseñanzas no universitarias. (fuente: elaboración propia)

El grupo de centros más numeroso es el que engloba infantil y primaria de 3 a 12 años. Dentro de éste, el más habitual es el denominado como C2 (centro de educación infantil y primaria y dos líneas de escolarización, con 18

aulas polivalentes en total), con un total, a la fecha de la consulta, de 752 centros, lo cual supone un 16,09 % del parque público actual. La superficie construida estimada promedio de este modelo de edificio es de 2.513 m<sup>2</sup>, con 18 aulas y 450 alumnos, de 3 a 12 años de edad. Así, la superficie construida total de este tipo de edificio puede estimarse en el entorno de 1.900.000 m<sup>2</sup> construidos que pueden dar servicio hasta a 338.400 alumnos.

En líneas generales, los edificios se desarrollan habitualmente en 1 ó 2 plantas en parcelas de unos 8.100 m<sup>2</sup>. Es habitual que estos centros evolucionen incluyendo una línea más, hasta un C3, con 27 aulas y 675 alumnos, en parcelas de hasta 12.500 m<sup>2</sup>. Estas parcelas de grandes dimensiones se suelen ubicar en la periferia de los núcleos urbanos, en zonas de nuevo desarrollo, con poco tráfico y una buena calidad del aire. Los centros que desarrollan enseñanzas de régimen especial, artísticas, etc... tienen sus propias condiciones de diseño, y suponen un porcentaje minoritario en el conjunto.

### 1.1.3 Condiciones del entorno inmediato de implantación de la edificación

El tamaño de la parcela donde se ubican los centros, se encuentra regulado en la normativa en función del tipo de centro. La nomenclatura de los tipos de centros se compone de una letra y un número. La letra responde al nivel educativo al que se destine el edificio y la letra el número de líneas de escolarización del centro. Así, un centro tipo C2 será un colegio de educación infantil y primaria (CEIP) (tipo C) de dos líneas de escolarización (2) con 2 aulas por cada curso. Los tipos de centro más representativos son los CEIP y los Institutos de Educación secundaria (IES) que se tipifican con la letra D. En el siguiente apartado se profundiza en este aspecto. Los modelos de centro más frecuentes con indicación de sus características se recogen en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2.** Características por tipo de centro (fuente: elaboración propia)

TIPO DE CENTRO	SUPERFICIE CONSTRUIDA (m <sup>2</sup> )	SUPERFICIE DE PARCELA (m <sup>2</sup> )	ocupación de la edificación (pb+1) (m <sup>2</sup> )	superficie de parcela libre (m <sup>2</sup> )	nº puestos escolares	Edad de los alumnos
C1	1.680	4.500	840	3.660	225	3-12
C2	2.513	8.100	1.257	6.844	450	3-12
C3	3.411	12.150	1.706	10.445	675	3-12
D2	2.461	4.320	1.231	3.090	240	12-16/18
D3	2.941	5.760	1.471	4.290	360	12-16/18
D4	3.931	7.680	1.966	5.715	480	12-16/18

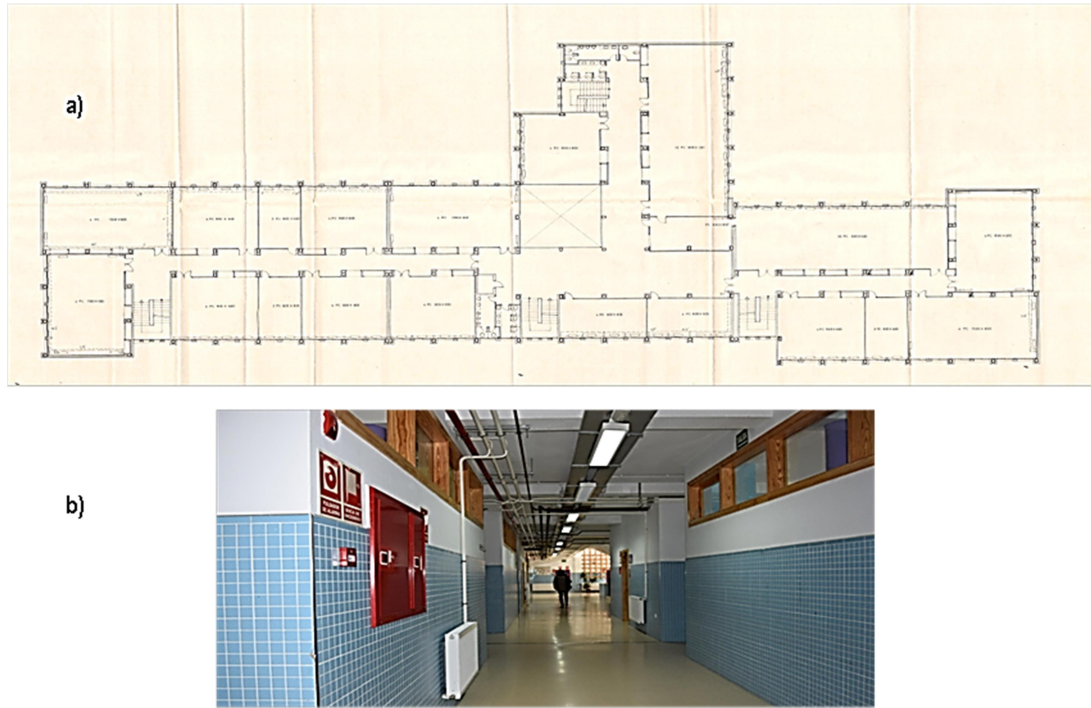
En la Tabla 4.2, se observa cómo los centros de nueva planta se ubican en parcelas con grandes superficies libres y abiertas y en zonas urbanas habitualmente periféricas, ya que estas dimensiones sin edificar difícilmente se encuentran en zonas urbanas céntricas o consolidadas. Esto lleva a que la edificación, que será preferentemente concentrada por razones de eficiencia energética y optimización de recursos, se ubicará en la misma en situación exenta y, por tanto, en condiciones de buena exposición al viento. Así mismo, en estas zonas periféricas la Calidad del Aire Exterior (CAE) suele ser buena, ya que además de estar ubicadas lejos de zonas de alta densidad de tráfico, superan los informes de salubridad, evitándose entornos industriales u otros con potencial riesgo de contaminación del aire.



**Fig.4.2** Ejemplo de implantación de un centro escolar en Bormujos, Sevilla. (fuente: google maps)

### 1.1.4 Esquema funcional

El diseño de los edificios de uso escolar se basa en una organización racional de los espacios. Las aulas se suelen agrupar en torno a un pasillo común a través del que se accede a ellas. Estas tienen además ventanas de grandes dimensiones para proporcionar iluminación natural suficiente, así como habitualmente disponen de ventanas altas en el paramento interior que da al pasillo para favorecer la ventilación y la iluminación natural.



**Fig.4.3.** Distribución típica de un edificio escolar. a) Planta baja de un IES en Sevilla (fuente: arriba archivo APAE (C. de E. Junta de Andalucía, n.d.); b) Ventanas altas practicables al pasillo. (fuente: elaboración propia)

### 1.1.5 Tipos de espacios

En todos los tipos de centro se pueden identificar diferentes grupos de espacios. En ellos, el tipo de espacio se caracteriza según su función. El número de espacios según su tipo, la identificación de los mismos y sus dimensiones se suelen detallar en un programa de necesidades en el cual se basa el desarrollo del proyecto.

En los centros en los que habitualmente se desarrollan las enseñanzas de régimen general, las aulas son el espacio principal donde se desarrolla la práctica docente. Éstas se clasifican en “polivalentes” que se adscriben a un grupo de escolarización, donde se imparten las distintas materias y las “específicas”, de uso rotatorio que se utilizan por los distintos grupos (aulas de música, plástica, gimnasio, biblioteca...etc).

El espacio docente que principalmente caracteriza el modelo de edificio es el aula polivalente, que es “la clase” de un determinado grupo escolar y habitualmente tiene un máximo de 25 alumnos en infantil y primaria, 30 en secundaria y 35 en bachillerato y ciclos formativos. Las aulas específicas tienen un uso determinado y son utilizadas de manera rotatoria por todos los grupos del centro, como el aula de música, de plástica, talleres y laboratorios, el gimnasio, las aulas de desdoble, etc... Adicionalmente, existen determinados grupos de espacios de apoyo. Principalmente estos son los de administración (secretaría, despachos, salas de profesores), los de servicios (almacenes, salas de instalaciones, aseos...), los complementarios (comedor, cocina y cafetería en su caso).



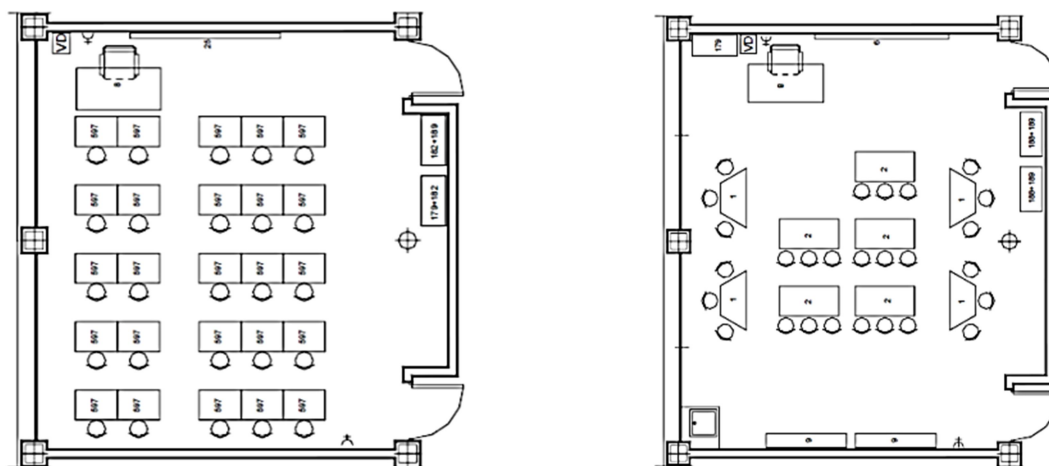


Fig.4.4. Plantas de aulas: izquierda) aula de educación primaria; derecha) aula de educación infantil. (fuente: reproducido de NNDD (Consejería de Educación y Ciencia. Junta de Andalucía et al., 2003).

### 1.1.6 Calidad del Ambiente Interior

Como ya se ha tratado en los capítulos anteriores, los elementos que más peso tienen en la caracterización de la calidad del ambiente interior son el Confort Térmico y la CAI.

**Confort térmico.** Numerosas publicaciones estudian las condiciones de confort en los edificios escolares, obteniéndose como principal conclusión que no existe una condición de confort única y estática para todos los casos. Telik et al. (Teli et al., 2017) sugieren que los estándares actuales de comodidad para adultos pueden no aplicarse a los escolares, por lo que la percepción del confort térmico dentro de las escuelas requiere estudios específicos. Estudios realizados en edificios escolares con funcionamiento en oscilación libre (free-running) en Portugal (Almeida, Ramos, & Freitas, 2016) y en Chile (Trebilcock, Soto-Muñoz, Yañez, & Figueroa-San Martín, 2017), observan cómo, en general, los estudiantes se sienten cómodos en los espacios escolares de este tipo de edificios y una gran mayoría mantendría las condiciones interiores sin cambios. Similares conclusiones obtiene Campano Laborda en su tesis en edificios escolares en Andalucía (Campano, 2015). Otros estudios analizan el confort térmico en los edificios escolares desde el enfoque del confort adaptativo. Liang et al. (Liang, Lin, & Hwang, 2012), prueban su aplicación en las escuelas en Taiwan. Dear et al. (Dear et al., 2017) lo estudiaron en aulas escolares en Australia, mostrando como rango aceptable de temperaturas de verano para los estudiantes australianos valores entre 19,5 °C y 26,68°C. Igualmente, Romana et al. (Romana, Ianniello, & Igor, 2013) usaron el índice PPD (porcentaje predicho de insatisfechos) y PMV (voto medio estimado) en aulas en Italia sin aire acondicionado y ventiladas por ventanas operables, validando el enfoque de Fanger en entornos con VN.

Las condiciones de confort interior deben alcanzarse tanto en época de invierno como de verano. Esto se puede conseguir tanto en edificios en oscilación libre (free-running) como en edificios que incorporen sistemas mecánicos de acondicionamiento. Según Santamouris (Santamouris, 2007), un edificio puede perfectamente ser diseñado para su funcionamiento en régimen de oscilación libre cuando las condiciones exteriores lo permiten y con sistemas mecánicos cuando lo anterior no es posible.

Las condiciones de confort interior se dan para espacios acondicionados mecánicamente en el RITE (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013), como un rango de valores fijo, mientras que las condiciones de confort interior en espacios no acondicionados mecánicamente son variables y su estimación se realiza en base a las condiciones de confort adaptativo. De este modo, el European Standard EN1525 (Nicol & Pagliano, 2007) permite considerar el confort térmico en edificios en free-running. En la Fig.4.5 se representan estas condiciones según el estándar Ashrae 55.

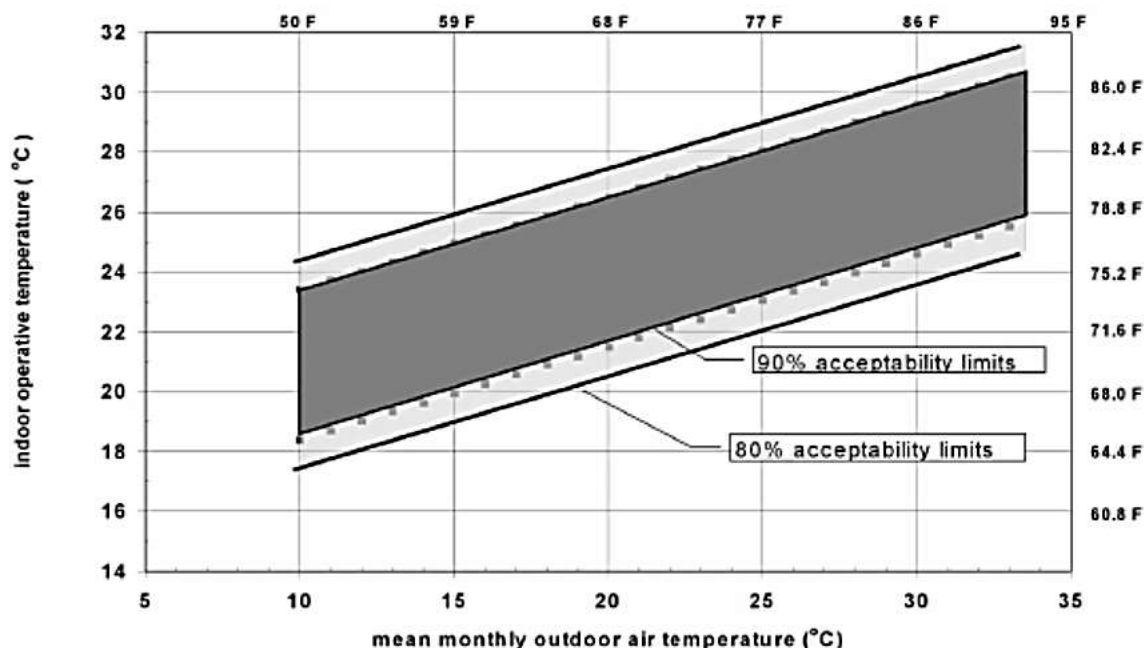


Fig.4.5. Rangos aceptables de temperatura operativa para espacios acondicionados naturalmente. (reproducido de Ashrae 55 "Thermal comfort standard" (American Society of Heating refrigerating and air conditioning engineers, 2004))

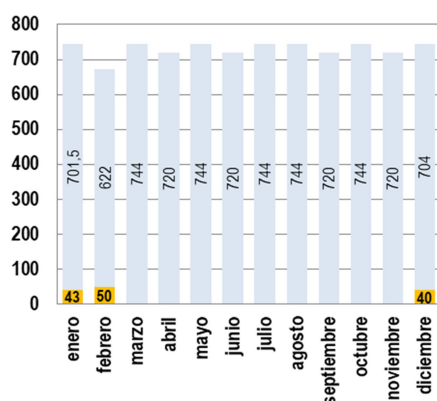
Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, las condiciones de confort se relacionan habitualmente con los parámetros de cálculo para instalaciones. Sin embargo, si se tienen en cuenta condiciones de confort adaptativo, estos parámetros no son valores fijos, sino que varían en función de las temperaturas exteriores de los días precedentes. Las condiciones de confort para espacios no acondicionados mecánicamente se dan en el estándar ASHRAE 55 (Fig.4.5), poniendo como condición para su aplicación la temperatura exterior media mensual no sea inferior a 10°C (50°F) o superior a 33,5°C (92,3°F).

Los edificios escolares, especialmente en las zonas con el clima más suave, no presentan una elevada demanda de calefacción, por un lado porque no se dan temperaturas exteriores extremadamente frías y por otro, debido a las ganancias internas (fundamentalmente por la ocupación). No obstante, el diseño de los edificios escolares que se analizan en esta tesis incluye sistemas mecánicos de calefacción para garantizar el confort térmico en régimen de invierno, mientras que se aplican principios de confort adaptativo en régimen de verano, por lo que no se disponen de manera generalizada sistemas de refrigeración mecánicos, resultando de este modo edificios que funcionan acondicionados mecánicamente en invierno y en "free-running" el resto del año académico.

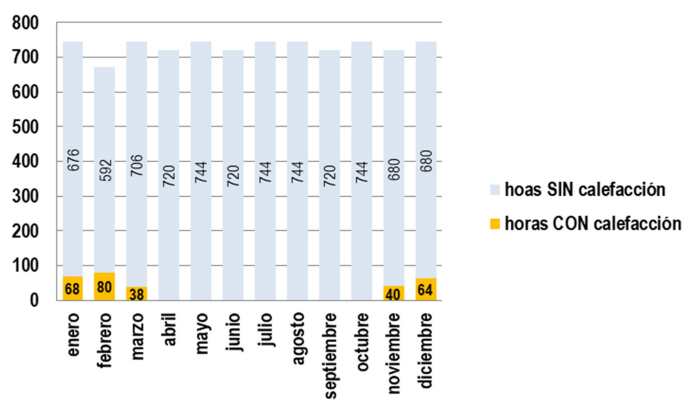
A lo largo del curso escolar (septiembre a junio), puede estimarse que la calefacción se utiliza en la temporada de invierno, aproximadamente la mitad de la jornada, en el caso más desfavorable, calculándose la instalación de calefacción en función de las condiciones establecidas por la UNE 100-014 "Climatización, bases para el proyecto. Condiciones exteriores de cálculo", en la cual se definen como meses de invierno, y por tanto de uso de la calefacción, diciembre, enero y febrero. El rango anual de funcionamiento de la instalación de calefacción es función del régimen de uso de los centros, tal como se muestra en Fig.4.6, según si la zona es más fría o se dan temperaturas más suaves.



a. Necesidad de calefacción en horas (clima suave)



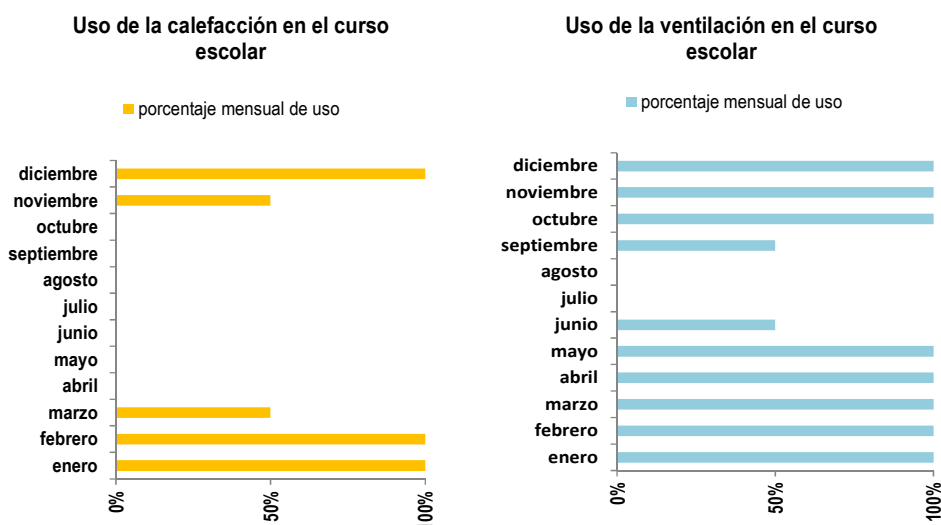
b. Necesidad de calefacción en horas (estimación general)



**Fig.4.6.** Distribución por meses de las horas en que es necesaria la calefacción en relación a la “época de invierno” definida por la UNE 100-014 para el cálculo de las instalaciones de climatización en relación a las horas totales anuales. a) clima suave; b) clima frío. (fuente: elaboración propia).

Para el caso de clima más suave (Fig.4.6 a.), considerando un promedio de 2,5 horas diarias de funcionamiento de la calefacción en los días lectivos de los meses de diciembre a febrero, el total de horas de funcionamiento de la misma sería de 133, lo cual supone un 1,5% del total de año, y un 15% del total de horas lectivas. En el caso de zonas de clima más frío (Fig.4.6 b.), podría considerarse la necesidad de ampliación de la época de uso de la calefacción más allá de lo que estrictamente marca la norma. En estos casos, el impacto horario del uso de la instalación de calefacción en el cómputo total anual sería como se muestra en el gráfico b de la Fig.4.6. Debe tenerse en cuenta en el proyecto de la instalación, tal como indica la Guía técnica del IDAE “Condiciones climáticas exteriores de proyecto” (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), 2010), que el nivel de temperatura a utilizar siempre ha de ser evaluado por el proyectista, de acuerdo con el cliente, buscando un balance entre el ahorro energético, confort y coste. A lo cual añade que, la renuncia a temperaturas interiores óptimas durante un número limitado de horas en el interior de los edificios, que además pueden ser horas de no ocupación, permite reducir de forma considerable el consumo de energía de las instalaciones y por tanto el coste asociado a las mismas.

**Calidad del aire.** La necesidad de acondicionamiento térmico dependerá de la época del año. Sin embargo, el requerimiento de ventilación si está presente a lo largo de todo el periodo escolar, ya que está relacionado con la ocupación y no con la temperatura. Los patrones típicos de demanda de calefacción y ventilación durante el periodo escolar a lo largo del año se presentan comparativamente en la Fig.4.7.



**Fig.4.7.** Patrones de demanda de calefacción y ventilación en edificios escolares en clima mediterráneo en término de porcentaje de días al mes. (fuente: elaboración propia).

En la Fig.4.7 se observa cómo la demanda de ventilación está presente a lo largo del curso escolar durante todas las horas lectivas, mientras que la de calefacción no se da todos los meses ni durante todas las horas del día. Son por tanto, dos aspectos diferentes que deben ser analizados de manera individualizada.

En cuanto a la consideración de la ventilación y las estrategias utilizadas, tradicionalmente, se incorporaban en los paramentos tanto interiores como exteriores de las aulas diferentes dispositivos para garantizar la ventilación. En la Fig.4.8 se muestran estrategias para posibilitar la ventilación cruzada con el pasillo.



**Fig.4.8.** Elementos para posibilitar la ventilación cruzada del aula al pasillo. (fuente: elaboración propia)

Poner especial cuidado en el diseño de la ventilación de las aulas, es una cuestión relacionada con la higiene y la salubridad que ha estado siempre presente en la normativa sectorial que regula el diseño de los edificios escolares. Las primeras referencias escritas se han encontrado en la norma del año 1923 (en parte reproducción literal de las del 28 de abril de 1905). En estas se recogía como un elemento fundamental, a tener en consideración en el diseño del aula, la forma de ventilación del espacio, dedicándole un apartado completo de la normativa. Adicionalmente se daban pautas de cómo conseguirlo, contemplando la posibilidad de disposición de extractores y de elementos de ventilación natural incluidos en el diseño del conjunto ventana-protección solar. Así, en relación a la admisión de aire a través de la fachada, el diseño de las ventanas también ha sido un elemento con diseños específicamente pensados para dar respuesta a la ventilación además de a la iluminación, como se muestra en la Fig.4.9.



**Fig.4.9.** Ventanas con secciones altas diseñadas específicamente para ventilación. Izda.) Imagen de un aula en el Grupo escolar Cervantes (fuente: <https://www.educa2.madrid.org/web/centro.cp.cervantes.madrid/historia-del-centro>); Dcha.) Imagen de un aula en un centro escolar en Sevilla (fuente: elaboración propia)

En la actualidad estas necesidades siguen vigentes, siendo además obligatorio según la normativa estatal (Educación, 2010), garantizar la ventilación e iluminación naturales y directas desde el exterior de todos los espacios de los edificios escolares. Las normas específicamente dedicadas al diseño de escuelas han ido recogiendo sucesivamente este aspecto en las recomendaciones de diseño, dándole especial importancia a la ventilación, como en el caso de las de la Junta de Construcciones Educativas del año '91. Sin embargo, se ha observado cómo con el tiempo este aspecto normativo ha ido desapareciendo de manera expresa, recuperándose de un modo u otro en el CTE (Ministerio de vivienda, 2006) DBHS (Ministerio de Fomento, 2017), asociando en esta ocasión a la hermeticidad y vinculado fundamentalmente a viviendas.

Deben por tanto tenerse en cuenta los dos aspectos fundamentales y complementarios que se combinan en la Calidad del Ambiente Interior: el confort térmico y la Calidad del Aire. Ambos son independientes y deben ser garantizados por igual. Sin embargo puede darse la circunstancia de para garantizar el uso se penalice el otro. Un claro ejemplo es la falta de ventilación que se produce en los edificios por estar en funcionamiento el sistema de acondicionamiento térmico, que hace que el usuario, desconocedor en muchos casos de esta doble vertiente del ambiente interior, no realice adecuadas acciones orientadas a la aireación de los espacios, lo cual puede conllevar una calidad del aire interior empobrecida.

## 1.2 Condiciones de funcionamiento

En relación a las condiciones de funcionamiento se analizan; i) el régimen de uso; ii) las condiciones de ocupación; iii) el tipo de usuario y iv) la densidad de ocupación

### 1.2.1 Régimen de uso

Los edificios de uso escolar funcionan de mitad de septiembre a mitad de junio, de lunes a viernes, salvo en la época de vacaciones de navidad y semana santa. Esto supone una media de 175 días al año. El horario de funcionamiento lectivo actual en la mayoría de los centros públicos es, en general, con horario intensivo de mañana, de 9 a 2 en infantil y primaria y de 8 a 3 en secundaria. En la fig. 4.10 se representa la estructura del curso escolar analizada según el número de días de ocupación por meses del año.

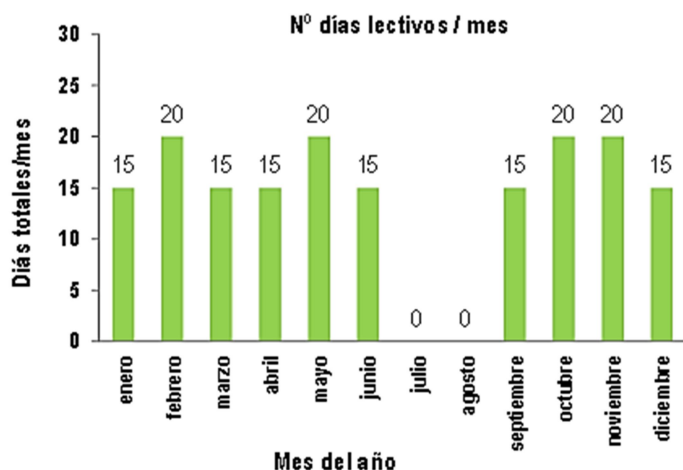


Fig.4.10. Estructura del curso escolar en el calendario anual. (fuente: elaboración propia)

En la Fig.4.10 se identifica el número de días lectivos mensuales en relación con el total. Los meses de julio y agosto la ocupación es nula, así como los de junio, septiembre, diciembre y marzo-abril suelen concentrar menor número de días hábiles escolares.

Según el número de horas diarias de ocupación de las aulas y el número de días lectivos, el régimen de ocupación anual total en horas es de 712 horas en educación Infantil y Primaria y 1.050 en Educación secundaria obligatoria y postobligatoria. Si se analizan estos datos en relación a las 8.760 horas del año, el porcentaje de utilización de estos edificios para funciones docentes, es del 8,12% y el 11,8% de las horas anuales en primaria y secundaria respectivamente.

Sólo cierto tipo de edificios cuyo volumen no alcanza el 5% del total del parque, tienen desdoble de clase por la tarde, como son los conservatorios y algunos centros de enseñanza secundaria y centros que imparten enseñanzas de Formación Profesional. Los centros de régimen especial, como pueden ser los conservatorios, tienen una configuración de espacios mucho más compleja y específica según el tipo de enseñanza, que no es objeto de este estudio. No obstante, los resultados que se obtengan sí podrían extrapolarse a los mismos, en el marco de un estudio específico.

### 1.2.2 Condiciones de ocupación

La ocupación del aula es no permanente y varía a lo largo de la jornada, como se aprecia en la Fig.4.11 a continuación. Esta ocupación variable e intermitente también se refleja como característica en los resultados del proyecto Zemeds (*NZEB renovation for Mediterranean schools*, n.d.), por lo que es común a todas las localizaciones. Así mismo, las aulas no siempre están ocupadas por los 25/30 alumnos, ya que en ocasiones se realizan desdobles para determinadas actividades, desplazando a la mitad del grupo a un aula de menores dimensiones y permaneciendo 10 o 15 niños en el aula de 50 m<sup>2</sup>.

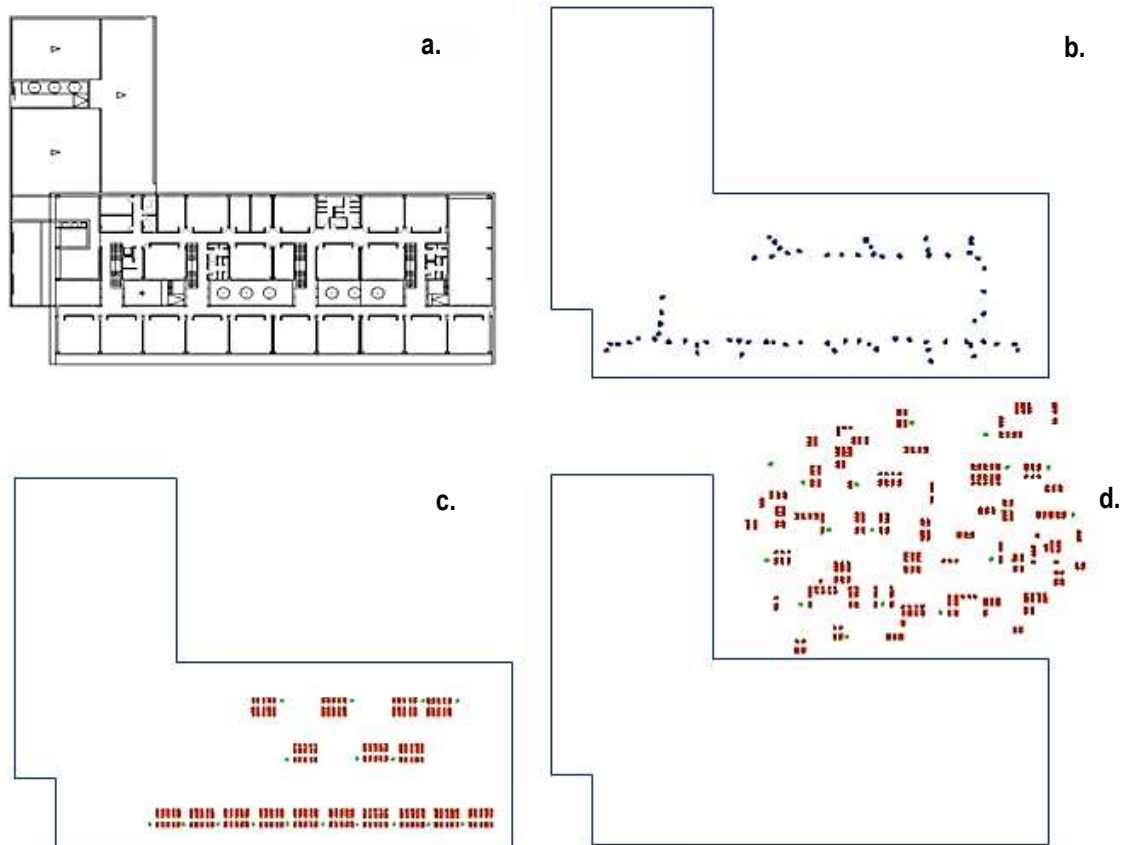


Fig.4.11. Esquema de ocupación no permanente de los edificios. (fuente: elaboración propia).

En el esquema de la Fig.4.11 se representa la ocupación la variación en función de las actividades que pueden ser previsibles, resultando una ocupación no permanente en el centro educativo. Así, en la imagen a. se representa la planta del edificio en las horas de no ocupación. En la b. se observa cómo sería en el momento de la entrada y la salida (con alumnos en el entorno de acercamiento al edificio, pero con el edificio vacío). En la c. se representa cómo sería una ocupación teórica en una hora cualquiera de un día lectivo (no están todos los espacios ocupados) y en el caso d. estaríamos representando el momento del recreo (con desocupación total del edificio al estar el alumnado desarrollando actividades en los espacios exteriores).

El calendario diario se suele organizar en varias sesiones lectivas según las materias, con descansos cada 45-50 minutos para el cambio de actividad, salida al recreo, uso del aseo.. etc. Además, en mitad de la jornada suele haber una parada de mayor duración, de unos 30 minutos correspondientes al recreo, donde se suelen desplazar al patio para desarrollar distintos juegos, tomar un bocadillo, etc.... En cualquier caso, dada la autonomía organizativa de los centros (Andalucía, n.d.), esta estructura se puede adaptar y diferir de un centro a otro, aunque las similitudes son habituales. Con los datos anteriores, el patrón de ocupación típica del aula de un día típico y a lo largo del año se presenta a continuación en la Fig.4.12 en la que se observa el grado de ocupación del aula a lo largo del día.



Fig.4.12. Variación en la ocupación diaria del aula de lunes a viernes. (fuente: propia)

En las Figs.4.11 y 4.12 se observa el uso discontinuo del edificio a lo largo del año. Así, teniendo en cuenta la parada de fin de semana, en el caso de mayor uso, los días hábiles son del entorno de 20 al mes, resultando 1/3 de los días en situación de desocupación.

### 1.2.3 Tipo de usuario

El usuario mayoritario de los edificios de uso escolar es el alumno. La ratio alumno-profesor suele ser en líneas generales 1-25, 30 ó 35 alumnos. Los niveles educativos no universitarios se clasifican en educación infantil, primaria, secundaria obligatoria y secundaria postobligatoria (FP y bachillerato) (Tabla 4.1), cuyo rango de edad oscila entre los 6 y 16 años en las enseñanzas básicas obligatorias, ampliándose de los 3 a los 6 años las de régimen general gratuitas de carácter voluntario.

### 1.2.4 Densidad de ocupación

El aula se identifica como el espacio principal del centro y se caracteriza por tener una elevada densidad de ocupación. La altura mínima de las aulas según normativa debe ser de 3 metros libres, por lo que un aula polivalente convencional tendrá un volumen de 150 m<sup>3</sup>. La densidad de ocupación de las aulas varía dependiendo del nivel educativo, tal como se muestra en la Tabla 4.3. En este sentido, se observa cómo el uso docente es muy diferente de otros usos como el de vivienda, donde el ratio de ocupación no es significativo (1 persona/25-30 m<sup>2</sup> como mínimo).

Tabla 4.3. Densidad de ocupación según el nivel educativo

NIVEL EDUCATIVO	Superficie del aula (m <sup>2</sup> )	Ocupación máxima (puestos escolares + profesor)	Ratio ocupación (m <sup>2</sup> /pe)
INFANTIL Y PRIMARIA (EI, EPO)	50	26	1,92
SECUNDARIA (ESO)	60	31	1,94
BACHILLERATO	60	36	1,66

Por otro lado, el funcionamiento del organismo del ser humano disipa energía calorífica en su funcionamiento mediante un proceso metabólico que convierte energía química en calor. Se estima que la generación de calor de una persona en reposo está entre los 65 y 80 vatios de calor, en función de su peso y tamaño. Comparativamente una bombilla incandescente de 60 w emite aproximadamente 55 w de calor. En el caso de niños, este valor sería variable, aproximadamente del siguiente modo: Si calculamos la superficie corporal según la fórmula de Haycock, para un valor de 64 w/m<sup>2</sup> de piel que corresponden a una actividad ligera sentado y el calor metabólico para cada rango de edad, tal como se refleja en la Tabla 4.4.



**Tabla 4.4.** Calor metabólico en función de la edad según la fórmula de Haycock (fuente: elaboración propia)

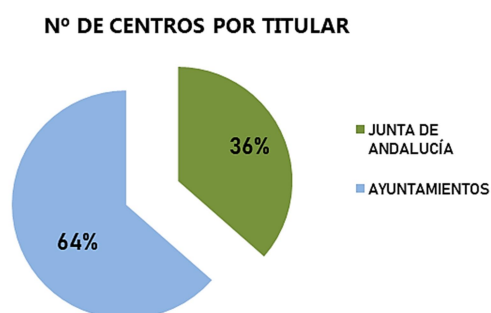
	edad	Peso (kg)	Altura (cm)	Sup corporal (m <sup>2</sup> )	Calor metabólico por alumno (sentado con actividad ligera 64 w/m <sup>2</sup> )
<b>INFANTIL PRIMARIA</b>	4	18	106	0,729	47
	6	22	118	0,848	54
	8	28	129	1	64
	10	37	141	1,203	77
<b>SECUNDARIA</b>	12	43	150	1,337	86
	14	54	160	1,55	99
	16	60	170	1,68	108

La norma UNE 13779 (AENOR, 2005) establece distintos parámetros de ratios de ventilación en función de la actividad metabólica de las personas, considerando como actividad metabólica 1,2 met para un trabajo normal sin elevados niveles de actividad. El RITE (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013), que se basa en esta norma para la definición de sus Instrucciones Técnicas, establece las condiciones de diseño de las instalaciones térmicas en su apartado IT11412 para personas con actividad metabólica sedentaria de 1,2 met, con grado de vestimenta de 0,5 clo en verano y 1 clo en invierno y un PPD entre el 10 y el 15%.

### 1.3 Condiciones de uso y mantenimiento

La propiedad de los edificios públicos de uso escolar es diferente según el nivel educativo al que se destine. La obligación de los municipios relativa a la conservación, mantenimiento y vigilancia de los edificios de titularidad local destinados a centros públicos de educación infantil, de educación primaria o de educación especial se recoge en diferentes leyes y normas, tales como el Decreto 18/2006 (Reglamento de Bienes de las Entidades Locales de Andalucía; la Ley 5/2010, de 11 de junio, de Autonomía local de Andalucía; la Ley 7/1985, redactado nuevamente por la Ley 27/2013 y la Ley Orgánica 2/2006, actualizada por la LOMCE (Ley orgánica 8/2013).

Los gastos de conservación y funcionamiento y mantenimiento los asume el titular, aunque el diseño y construcción de los nuevos edificios escolares sean llevados a cabo por la comunidad autónoma, por lo que hay 770 potenciales propietarios de los edificios (tantos como municipios andaluces), responsables de asumir estas tareas y costes. Por tanto, la simplicidad en el diseño, así como la minimización de las tareas de mantenimiento posterior deben ser una premisa básica en el diseño de este tipo de edificios. En la Fig.4.13 se indica el porcentaje de centros propiedad de los Ayuntamientos y los de titularidad de la autonómica sobre el total del parque público existente.



**Fig.4.13.** Distribución del porcentaje de centros en función del titular. (fuente: elaboración propia en base a los datos de la Consejería de Educación)

En cualquier caso, e independientemente del propietario, lo ajustado de los fondos destinados para su conservación, funcionamiento y mantenimiento es una tónica general. Además, ha de tenerse en cuenta que la responsabilidad de la administración radica en optimizar la utilización de los fondos públicos de la manera más eficiente posible, evitando gastos superfluos o innecesarios e independientemente de la capacidad económica de la que disponga, ya que esta puede ser una variable en el tiempo, mientras que el edificio debe perdurar durante muchos años dando respuesta para el fin para el que fue construido de la forma más adecuada posible, lo cual se puede conseguir simplificando la edificación y sus instalaciones. Así mismo, debe tenerse en cuenta esta premisa a lo largo de toda la vida útil.





## 2.- Ámbito geográfico y climático

### Resumen

En este apartado se tratan las condiciones específicas relacionadas con la geografía y el clima de la zona en la que se desarrolla el objeto de investigación de esta tesis. Se compone de 4 apartados en los que se realiza un encuadre geográfico para a continuación resumir las condiciones generales del clima en Andalucía. En los 2 últimos apartados se detallan las condiciones climáticas, analizando la clasificación climática por municipios según la normativa actual, centrándonos específicamente en Andalucía y sus municipios. A continuación se identifican las condiciones de invierno y de verano desde el enfoque de tres bases de datos climáticas. Por último se estudian los climogramas y las cartas climáticas de Givoni y Olygay y su aplicación a la arquitectura y el diseño bioclimático de edificios en Andalucía.

### 2.- Ámbito geográfico y climático

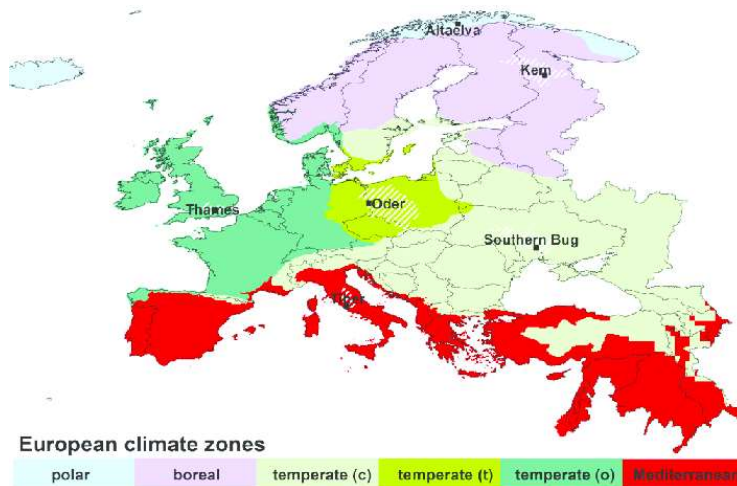
2.1	Marco geográfico .....	157
2.2	El clima en Andalucía .....	157
2.3	Clasificación climática por municipios .....	158
2.3.1	Clasificación según el CTE .....	158
2.3.2	Clasificación de los municipios andaluces .....	159
2.3.3	Análisis de las condiciones de temperatura exterior .....	160
2.4	Climogramas y cartas bioclimáticas (Olygay y Givoni) .....	165
2.4.1	El climograma de Olygay .....	165
2.4.2	La carta bioclimática de Givoni .....	166
2.4.3	Aplicación a la geografía andaluza .....	167

## 2.1 Marco geográfico

Situado al sur de la Península Ibérica, el territorio andaluz es tan amplio que supone casi la cuarta parte de la superficie del español con más de 87.200 km<sup>2</sup>, casi 8,5 millones de habitantes y 770 municipios. La geografía es compleja, con zonas de montaña, valle y costa. Es una zona muy expuesta al mar, presentando 853 km de costa (294 atlántica y 559 mediterránea). Limita al oeste con Portugal; al sur con el océano Atlántico y el mar Mediterráneo; al este con dicho mar y Murcia; y al norte con Extremadura, Castilla-La Mancha y Murcia. Ocupa una posición estratégica entre Europa y África y al mismo tiempo, como tránsito por el estrecho de Gibraltar, entre el Atlántico y el Mediterráneo. Comprende ocho provincias: Almería, Cádiz, Córdoba, Granada, Huelva, Jaén, Málaga y Sevilla. En Andalucía pueden considerarse tres zonas distintas: Sierra Morena, el valle del Guadalquivir y las cordilleras Béticas. En Sierra Nevada se alcanzan las cumbres más altas de la Península, que culminan en el Mulhacén, de 3.481 metros ("Medioambiente-Junta Andalucía," n.d.).

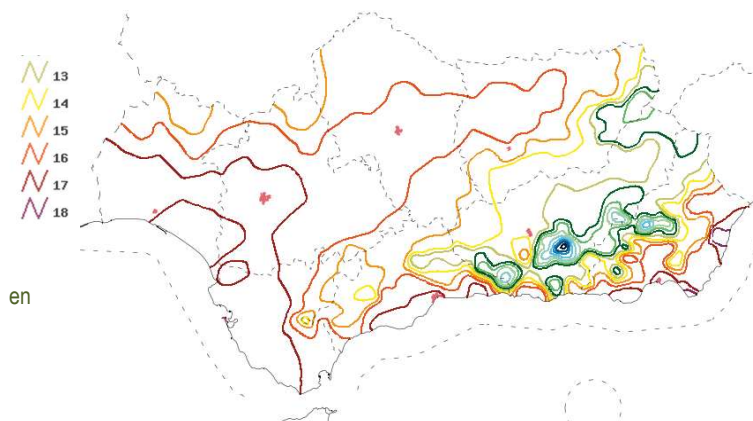
## 2.2 El clima en Andalucía

Andalucía se caracteriza por encontrarse en zona de clima mediterráneo, con influencias atlánticas o continentales. Según la clasificación de Köppen, Andalucía se encuentra caracterizada por tener un clima similar al resto de zonas señaladas con el mismo color, tal como se refleja en la Fig. 4.14.



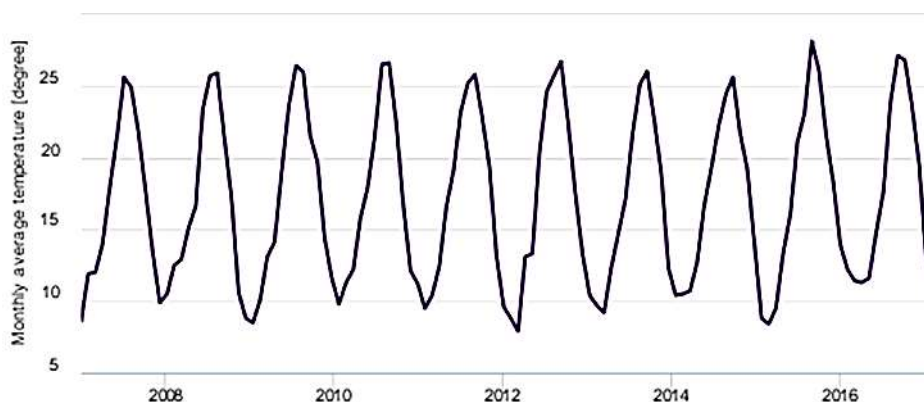
**Fig.4.14.** Zonas climáticas en Europa según la clasificación de Köppen (reproducido de (Schneider & Laiz, 2013))

El clima mediterráneo presenta en general veranos calurosos y secos y temperaturas suaves en invierno y precipitaciones irregulares. En Andalucía existen diversas variantes del mismo, con una temperatura media anual que alcanza distintos valores, presentándose un gradiente costa-interior y un fuerte gradiente altitudinal, de forma tal que los valores más bajos (inferiores a 8-10°) se encuentran en los enclaves montañosos del interior de las cadenas Béticas (Sierras de Cazorla y Segura, Sierra Nevada, etc.), según la Fig. 4.15



**Fig.4.15.** Temperatura media anual Andalucía (JUNTA DE ANDALUCÍA, n.d.)

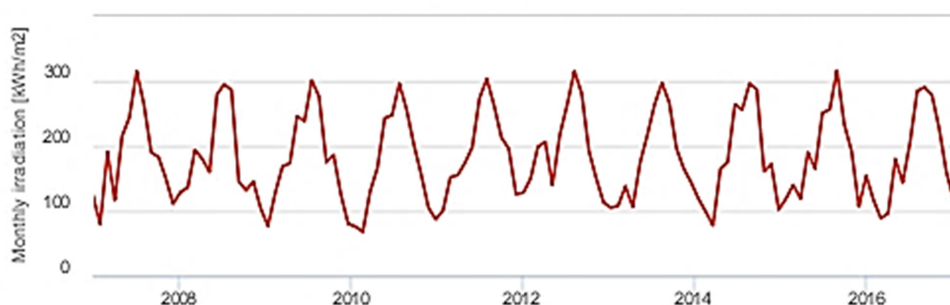
La evolución de temperaturas mensuales de los últimos años se representa en la Fig.4.16, según la base de datos de la aplicación de la Comisión Europea PVSIG, diseñada para realizar el cálculo y dimensionamiento de instalaciones de energía solar fotovoltaica.



**Fig.4.16.** Promedio mensual de temperatura según la base de datos de la Comisión Europea PVSIG (European Commission, n.d.)

En la Fig.4.16 se observan valores de promedios de temperatura suaves que oscilan entre los 7 y los 27°C.

Dentro de este clima global, se presenta un abanico variado de sub-climas, con la constante de poseer las isothermas anuales más elevadas de España, siendo el rasgo que mejor identifica el clima andaluz el gran número de horas de sol al año. Todo el valle del Guadalquivir y los espacios costeros, con la excepción del área del estrecho de Gibraltar, supera las 2.800 horas de sol al año, sobrepasándose incluso las 3000 horas en algunos enclaves del golfo de Cádiz y la costa almeriense. El resto de la región queda comprendido entre 2800 y 2.600 horas de sol. La radiación solar estimada de los últimos años se recoge en la aplicación de la Comunidad Europea PV SIG (European Commission, n.d.) en la Fig. 4.17.



**Fig.4.17.** Estimación de radiación solar mensual en kWh/m² según PVSIG (European Commission, n.d.)

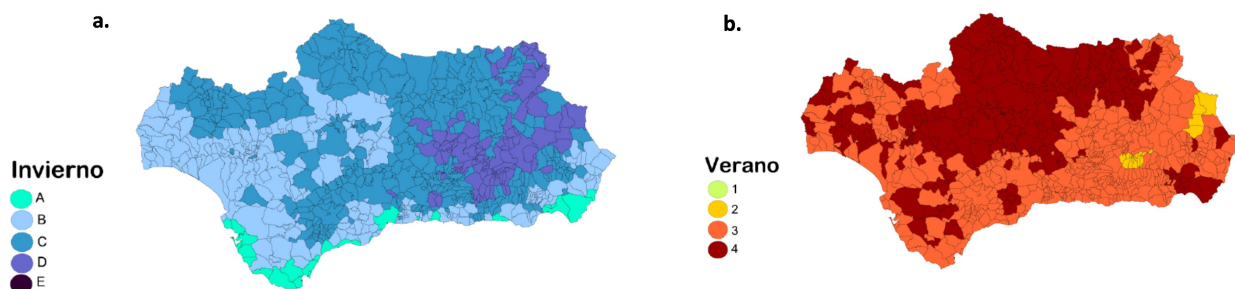
Estos altos valores de insolación, se traducen en una elevada incidencia de la radiación solar. Según los datos obtenidos de la aplicación informática de acceso libre de la Agencia Andaluza de la Energía (AAE) (Innovación, n.d.), los valores de radiación directa se encuentran entre los 70 y los 280 kWh/m², en los meses de enero y junio.

## 2.3 Clasificación climática por municipios

### 2.3.1 Clasificación según el CTE

La normativa española (Ministerio de Fomento, n.d.-b) identifica varias zonas sub-climáticas dentro del ámbito geográfico, dependiendo del clima de invierno y verano y las condiciones térmicas. Las condiciones de invierno se

representan de la A a la D, de un clima más cálido a más frío y un número de 1 a 4 representa las condiciones de verano de un clima más suave a más cálido. Las condiciones de verano e invierno bajo esta clasificación se

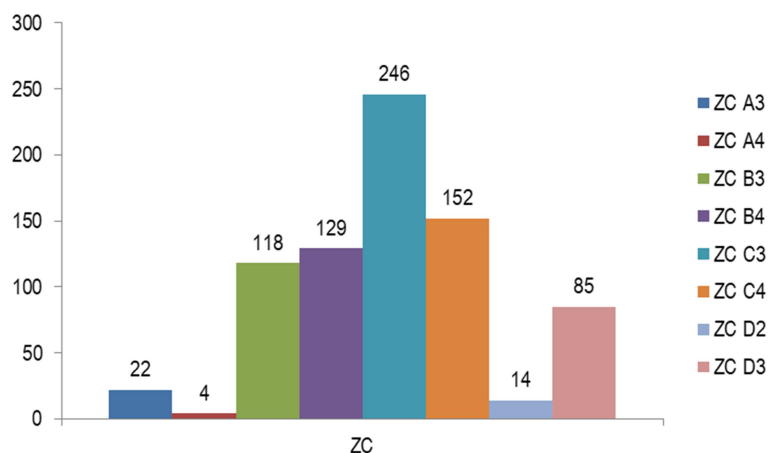


representan en la Fig.4.18.

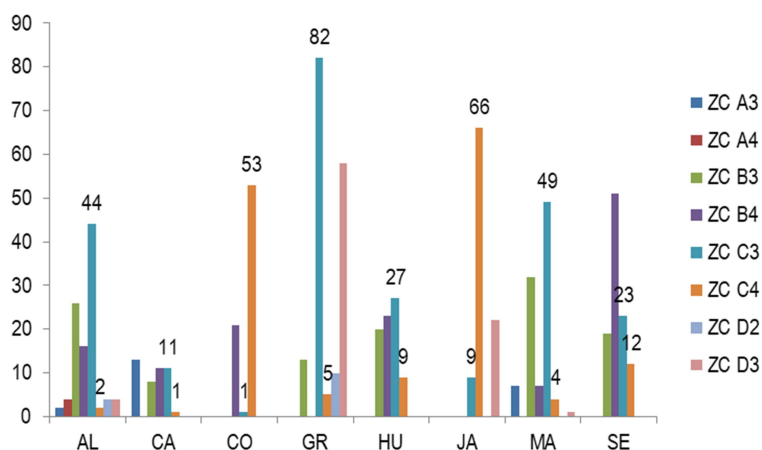
**Fig.4.18.** Zonas climáticas por municipios. a) invierno (SCI severidad climática de invierno); b) verano (SCV severidad climática de verano) (. Reproducido de (Agencia Andaluza de la Energía, 2008)

## 2.3.2 Clasificación de los municipios andaluces

El documento “Zonificación Climática de Andalucía por Municipios para su uso en el Código Técnico de la Edificación en su sección de Ahorro de Energía apartado de Limitación de Demanda Energética (CTE-HE1)”, de la Agencia Andaluza de la Energía y publicado en la web del CTE <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-01-documentos-reconocidos-cte/menu-registro-general-documentos-reconocidos-cte-dr.html>) (Agencia Andaluza de la Energía, 2008), clasifica los 770 municipios andaluces según la nomenclatura del CTE. Analizando los datos anteriores, la clasificación climática de los municipios de Andalucía queda tal como se representa en las Figs.4.19 y 4.20.



**Fig.4.19.** Zonas climáticas (ZC) en Andalucía. N° de municipios con una zona climática determinada. (Fuente: Elaboración propia según datos obtenidos de (Agencia Andaluza de la Energía, 2008))



**Fig.4.20.** Zonas climáticas en Andalucía. N° de municipios con una zona climática determinada por provincias. (Fuente: Elaboración propia según datos obtenidos de (Agencia Andaluza de la Energía, 2008))

ZC: zona climática; AL: Almería, CA: Cádiz; CO: Córdoba; GR: Granada; HU: Huelva; JA: Jaén; MA: Málaga; SE: Sevilla

En las Fig.4.19 y Fig.4.20 se identifican el número de municipios según provincias y su clasificación sub-climática. De su análisis se observa lo siguiente:

- El grupo más numeroso es el de municipios con clasificación C3, con 246 municipios (31,94% del total de municipios). Se caracterizan por tener inviernos fríos (C) y veranos calurosos (3), pero no alcanzan la máxima clasificación de verano.
- El segundo grupo es de los C4 con 152 municipios, caracterizados por tener extremos opuestos, esto es inviernos fríos (C) y veranos muy calurosos (4). Estos 152 municipios suponen el 19,74% del total.
- No hay ninguna localidad en Andalucía que combine severidad extrema de invierno y de verano (D4)
- Si se analiza el conjunto de municipios desde el enfoque de la clasificación de invierno, el mayor número de municipios (64,54%) son C ó D (497) y desde la clasificación de verano, (62,98%) son 2 ó 3 (485).
- Los municipios más calurosos en verano (4) son 285 y representan sólo un 37% del total. Sin embargo, el mayor número de municipios se clasifican con una SCV 3, suponiendo el 61,16% del total.
- Por otro lado, la gran mayoría del conjunto de municipios más calurosos en verano (4), presentan inviernos medios o fríos (B y C), con 129 (B4) y 152 (C4) respectivamente. Sólo hay 4 localidades que combinan inviernos muy suaves (A) y veranos calurosos (4).
- El mayor número de municipios con SCV4, tienen una caracterización de invierno C, con inviernos fríos. Son 152, lo cual supone un 19,74% del total de municipios de Andalucía y un 53,33% del total de los caracterizados en 4. El siguiente grupo es el de los B4 con 129 municipios (16,75% del total de Andalucía y un 45% de los de SCV 4). Los municipios A4 no son representativos al ser sólo 4 (0,5% del total y 1,4% de los de SCV 4).

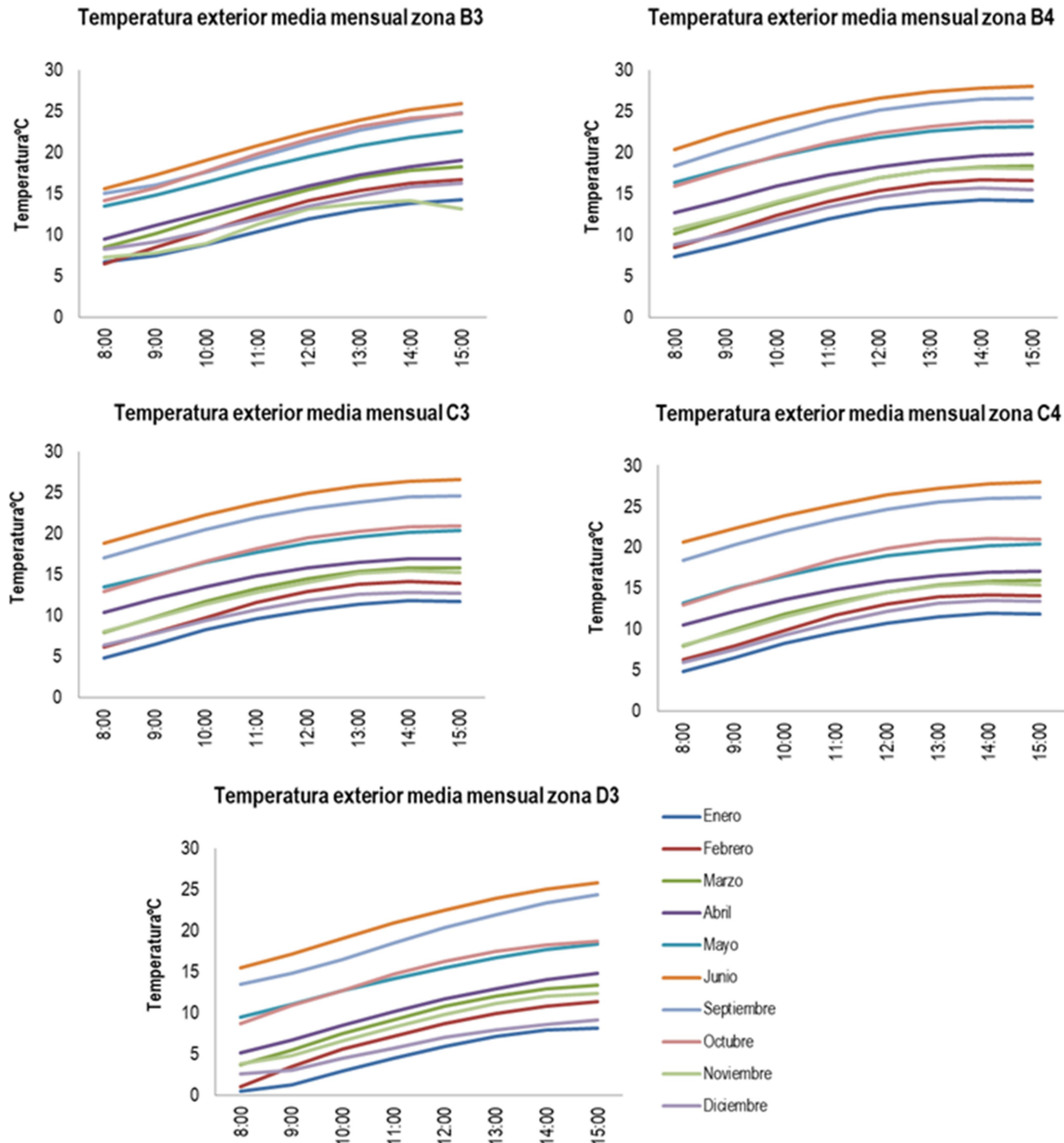
Por tanto, no pueden realizarse afirmaciones generalistas en cuanto a la homogeneidad de la temperatura a lo largo del año en Andalucía (en términos de verano ni en términos de invierno), ya que se comprueba que se producen ambos extremos en la mayoría de las diferentes localizaciones (incluso con inviernos fríos o muy fríos en los municipios con SCV más alta). Así, aun perteneciendo toda la zona al ámbito Mediterráneo, con un clima genérico claramente diferenciado del resto de Europa y de los países del norte, existe una sub-clasificación con sus propias particularidades.

### 2.3.3 Análisis de las condiciones de temperatura exterior

Las condiciones de temperatura exterior, así como la variación diaria de la misma en relación a las máximas y mínimas son elementos, que junto con los aspectos de la transmitancia térmica de la envolvente, elementos de sombreados, etc... colabora en determinar las condiciones interiores de temperatura, así como la necesidad o no de sistemas mecánicos de acondicionamiento térmico. Según lo visto anteriormente, en la mayoría de los municipios será necesario disponer un sistema de calefacción, ya que el curso escolar se desarrolla mayoritariamente en la época del año en la que las temperaturas exteriores serán bajas. Se ha visto que más del 50% de municipios tiene una clasificación de invierno C ó D (497).

Si se analiza desde la perspectiva de los sistemas de refrigeración estos también serían necesarios (con 285 municipios con clasificación 4), si el curso escolar se desarrollase en los días y horas con mayor nivel de temperatura exterior. La situación real a día de hoy, es que los días de más calor y las horas en las que se alcanzan las temperaturas más altas, los centros escolares permanecen cerrados sin actividad docente, por lo que esta es una cuestión ampliamente debatida que requiere de un análisis particularizado.

Para analizar lo anterior en mayor detalle, se estudian las temperaturas en las horas lectivas en las que los edificios escolares mantienen actividad docente a lo largo del curso escolar, procediéndose con la siguiente metodología: i) Para un primer análisis se toman los datos climáticos recogidos en los archivos \*.met que pone a disposición el Ministerio en el CTE (Ministerio de Fomento, n.d.-b), en el que se dan los valores horarios diarios entre los cuales está el de temperatura seca exterior. Se estudian las ZC con mayor número de municipios B3, B4, C3, C4 y D3; ii) Se procesan los datos para cada zona climática, extrayendo los correspondientes a una jornada de 8:00 a 15:00 horas los meses lectivos, esto es del 7 de enero al 15 de junio y del 15 de junio al 15 de diciembre.



**Fig.4.21.** Temperaturas medias mensuales por horas y zona climáticas. (Fuente: elaboración propia según los archivos .met (Ministerio de Fomento, n.d.-b))

En los gráficos representados en la Fig.4.21 se observa que la temperatura media mínima no es inferior a los 4,5°C, salvo para la ZC D, estando siempre por encima de los 10°C a partir de las 11:00 del mediodía, salvo en el caso de Granada y Jaén, que se queda por encima de los 9,5°C. La zona climática D es una excepción, pero ha de tenerse en cuenta que su impacto es minoritario en el territorio. En cuanto a las condiciones de verano, en la Fig.4.21 se observa también cómo la temperatura media máxima no alcanza los 30°C durante el horario lectivo, coincidiendo la temperatura media máxima siempre con la última hora lectiva (15:00). Adicionalmente debe tenerse en cuenta que hay niveles educativos que finalizan a las 13:45 las clases.

En los dos apartados anteriores, se han analizado en ambos casos (invierno y verano), las temperaturas medias mensuales con una única base climática. Para contrastar la estimación previa realizada en el apartado anterior, se analizan 3 bases de datos de temperaturas diferentes, con la finalidad de conocer el número de horas del horario escolar en que las temperaturas exteriores están por debajo de un cierto umbral y por tanto, es posible utilizar este tipo de estrategia. Las 3 bases de datos analizadas son las siguientes:



Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, n.d.-a).- La Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo, del Ministerio de Fomento, publica en formato informático los datos que definen el clima de referencia de cada zona climática, que establece las condiciones exteriores de cálculo. Sus características fundamentales son:

- Configuran un año estadístico basado en medida de varios años anteriores.
- Están disponibles datos para todas las zonas climáticas.
- Estos datos son los que utilizan los programas oficiales de certificación energética para analizar el balance de la demanda energética de los edificios.

SIAR (aplicación del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente) (MAPAMA, n.d.).- El Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, a través de la Subdirección General de Regadíos y Economía del Agua, pone a disposición de los usuarios de forma gratuita toda la información recogida a través de la Red de estaciones agrometeorológicas de SIAR, permitiendo la consulta y descarga de datos meteorológicos diarios, semanales o mensuales de una o varias estaciones. El programa proporciona datos cada media hora, utilizándose cada hora para homogeneizar con las otras bases de datos que se analizan.

Para este caso se utilizan los datos de la estación de Córdoba y se promedian los datos diarios y horarios del periodo de análisis de los últimos 7 años (2010-2017) para comparar con las otras fuentes.

AMT-A (aplicación de la Agencia Andaluza de la Energía) (Agencia Andaluza de la Energía, n.d.).- La Agencia Andaluza de la Energía ha desarrollado una serie de programas informáticos que pretenden servir de ayuda a los técnicos y profesionales en las distintas áreas de energías renovables, herramientas de cálculo con las que simular el uso de instalaciones, siendo AMT el programa de cálculo en años meteorológicos tipo. Configuran un año estadístico basado en medidas de varios años anteriores. Se han obtenido los datos para la localización de estudio y ámbito temporal acotado.

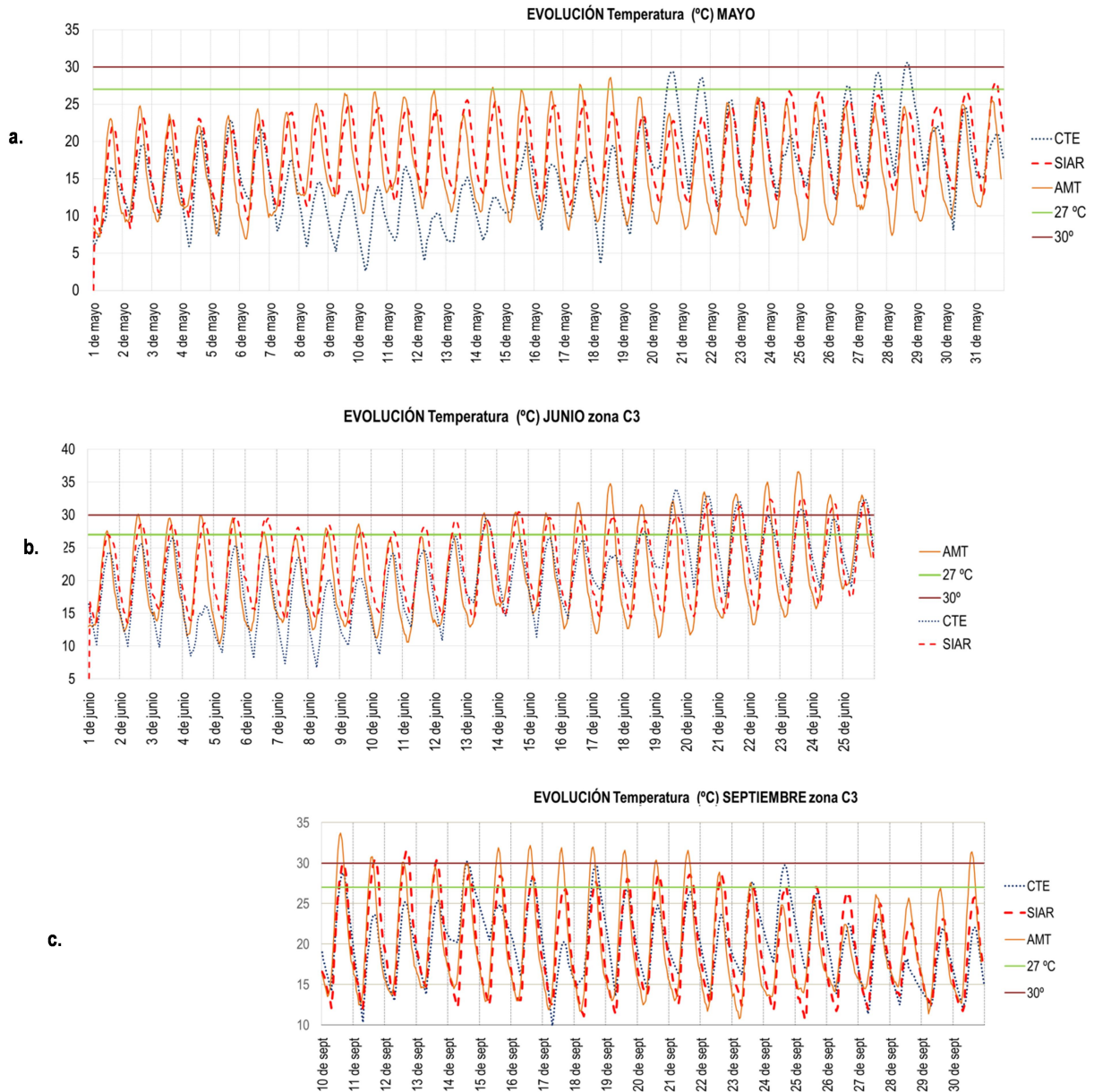
Los resultados obtenidos se reflejan en la Tabla 4.5 y en la Fig.4.22, en las que se representan el promedio de las temperaturas exteriores obtenidas para las 3 bases de datos climáticas para las zonas climáticas C3 y C4 (con mayor número de municipios C3 y con una severidad de verano alta C4).

**Tabla 4.5.** Temperaturas exteriores en horario escolar. Promedio de las 3 bases de datos

	Temperaturas exteriores. Promedio de las 3 bases de datos		Temperaturas exteriores. Promedio de las 3 bases de datos		Resultados en % anual			
	Días al año con alguna hora con temperatura > 27°C	Horas al año con temperatura > 27°C	Días al año con alguna hora con temperatura > 30°C	Horas al año con temperatura > 30°C	% de días lectivos al año con alguna hora con temperatura >27°C	% de horas lectivas al año con temperatura >27°C	% de días lectivos al año con alguna hora con temperatura >30°C	% de horas lectivas al año con temperatura >30°C
<b>C3</b>	16,67	28,33	3,67	5	9,31%	2,26%	2,05%	0,40%
<b>C4</b>	20,33	42,33	7,67	13	11,36%	3,38%	4,28%	1,01%

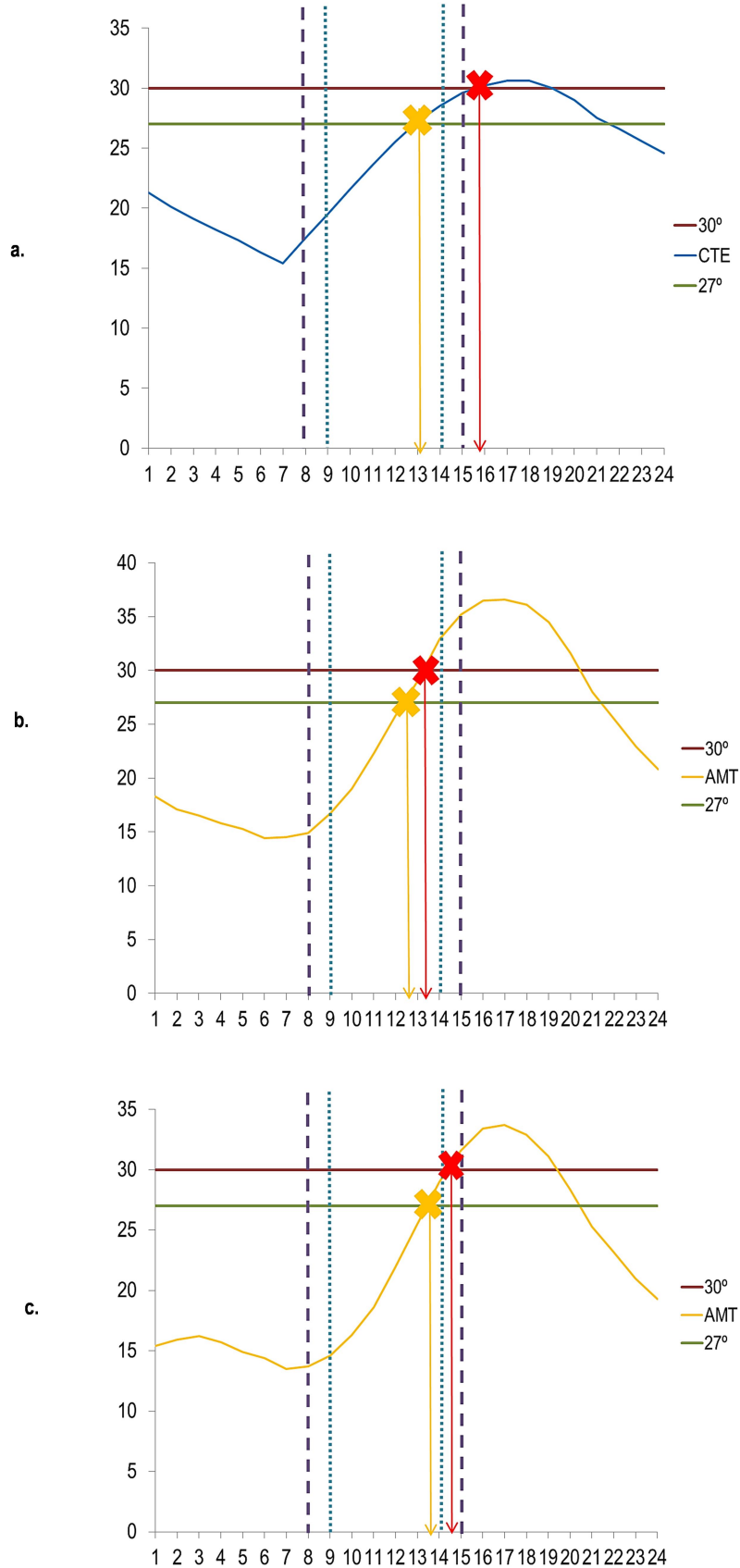
Según los datos que se representan en la Tabla 4.5, se obtiene como resultado principal que las temperaturas externas están por encima de un umbral de criterios de confort de 27°C solo un promedio entre 28,33 horas y 42,33 horas a lo largo de todas las horas lectivas, dependiendo de la zona sub-climática, lo que supone solo el 2,26% y 3,38% de las horas lectivas al año. En la Fig. 4.22 se representa la evolución de las temperaturas a lo largo de los meses de mayo, junio y septiembre para la zona climática con mayor número de municipios C3 (31,94% del total de los municipios andaluces), según las 3 bases de datos.





**Fig.4.22.** Evolución de la temperatura exterior durante la jornada lectiva en época de verano según 3 bases de datos diferentes: a) Mayo, b) Junio and c) Septiembre. En la abscisa se representa los días del mes y en el eje y la temperatura en °C para la zona climática C3 (fuente: propia)

Por otro lado, si identificamos el día con la temperatura más alta en cada mes, estos son el 28 de mayo (base de datos 1), el 23 de junio (base de datos 3) y el 10 de septiembre (base de datos 3), alcanzándose los 30, 36 y 34°C, tal como se muestra en la Fig.4.23.



**Fig.4.23.** Evolución de la temperatura exterior en el día más caluroso identificado en las bases de datos analizadas: a) CTE (mayo); b) AMT (junio); c) AMT (septiembre) (fuente: propia)

Analizando los datos reflejados en los gráficos de la Fig.4.23, se observa cómo la temperatura máxima del día se alcanza en torno a las 17:00 horas y en todos los casos fuera del horario lectivo.

## 2.4 Climogramas y cartas bioclimáticas (Olygay y Givoni)

Los climogramas de Olygay y las cartas bioclimáticas de Givoni permiten conocer el potencial de diseño bioclimático de una localización determinada. Ambas constituyen una interesante herramienta para la caracterización del potencial de utilización del clima en las estrategias de acondicionamiento de los espacios interiores y del diseño bioclimático de las edificaciones, prácticamente desconocida y por tanto infrutilizada en la actualidad en la conceptualización de la sostenibilidad del diseño de los edificios.

### 2.4.1 El climograma de Olygay

En él se representan las condiciones básicas que afectan a la temperatura sensible del cuerpo humano (humedad relativa en el eje de abscisas y temperatura en el de ordenadas). Se representa el clima anual de una zona mediante las condiciones de temperatura y humedad. Se suelen utilizar las medias de temperatura y humedad mensuales, aunque se considera más representativo utilizar las medias de máximas y mínimas de los días medios de cada mes (porque identifican las oscilaciones diarias de temperatura y humedad que señalan las distintas necesidades según la hora, que a veces son muy distintas). Se representa en la Fig.4.24.

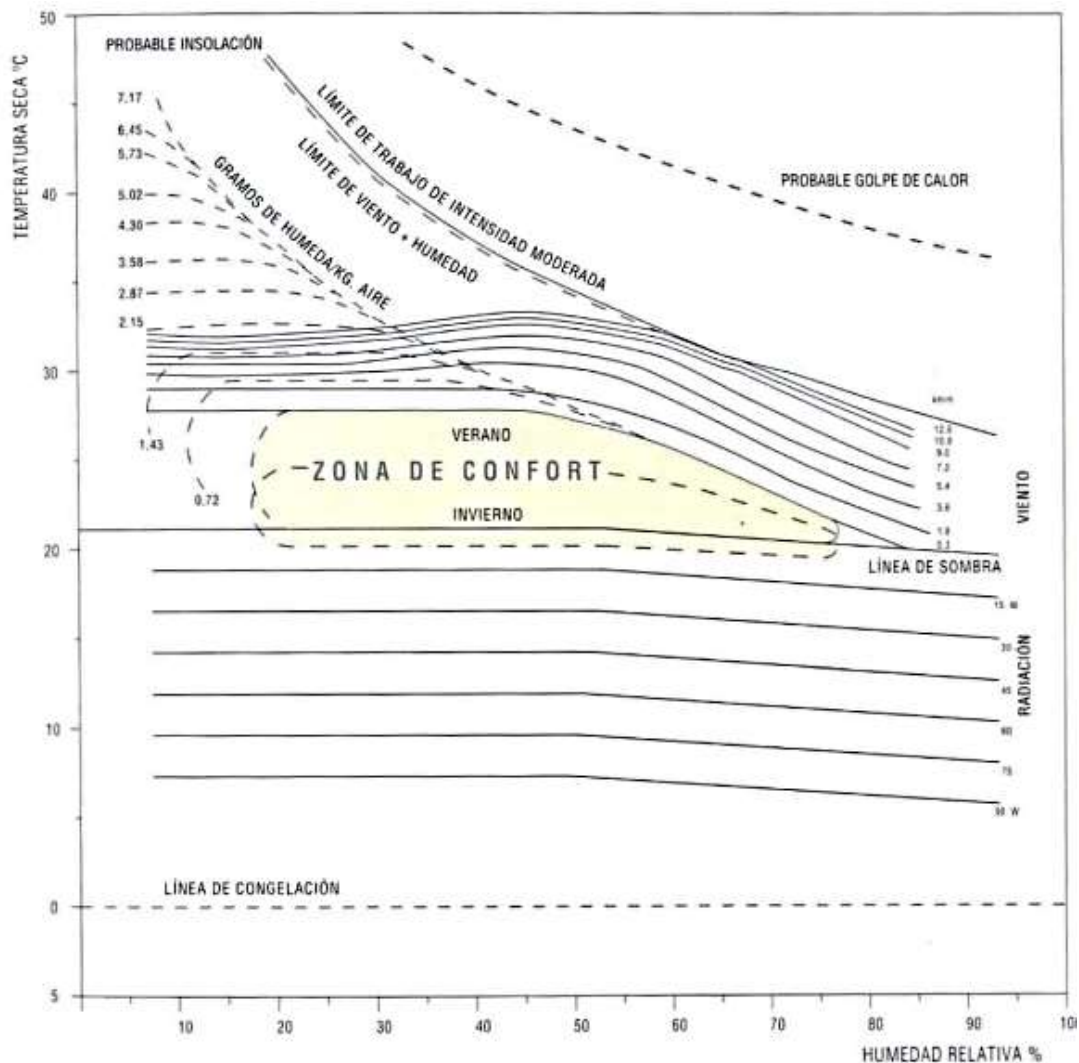


Fig.4.24. Carta de Olygay. Reproducido de la publicación (Jaime Lopez de Asiain, Rafael González Sandino, José María Cabeza Láinez, Margarita de Luxán García de Diego, Flavio Celis D'Amico, Fernando da Casa Martín, Ernesto Echevarría Valiente, 1997)

Este diagrama (Fig.4.24) está diseñado para condiciones de exterior y no tiene en cuenta el edificio y las variaciones que éste produce en las condiciones temperatura-humedad interior. No obstante y dado que cuantifica las necesidades para la obtención del bienestar, puede utilizarse como indicador de las condiciones que se deben crear en el interior de las edificaciones.

Dentro de él se señala la zona de confort (zona que contiene los sistemas de valores temperatura-humedad en las que el cuerpo humano requiere el mínimo gasto de energía para ajustarse al medio ambiente). Esta zona de confort también se define como aquella en la que a la sombra, con ropa ligera y con baja actividad muscular se tiene sensación térmica agradable. Una vez representado el clima se pueden observar en él las condiciones medias de humedad-temperatura que se dan en cada momento y su desviación con respecto a la zona de bienestar. El límite inferior de la zona de confort (21°C) establece una separación por encima de la cual es necesaria la utilización de la protección solar y por debajo de la cual se necesita radiación.

Los puntos del diagrama por encima de la zona de confort identifican sobrecalentamiento (condiciones climáticas en las que hay un exceso de calor). La zona de bienestar asciende con el movimiento del aire y desciende por radiación solar. Para restablecer las condiciones de confort en situaciones de sobrecalentamiento se podrán adoptar medidas correctoras en el diseño como la creación de protecciones solares, el aprovechamiento del viento o la generación de corrientes de aire. En el caso de tener humedad relativa baja, se puede utilizar el efecto refrigerante de la evaporación, utilizando estrategias para incrementar el vapor de agua. Si los puntos temperatura-humedad que están por debajo de la zona de confort se estará en situación de "infracalentamiento". En este caso, las medidas bioclimáticas que se pueden utilizar para restituir el confort es la utilización de la radiación, bien la solar directa o indirecta o de cualquier otro tipo.

## 2.4.2 La carta bioclimática de Givoni

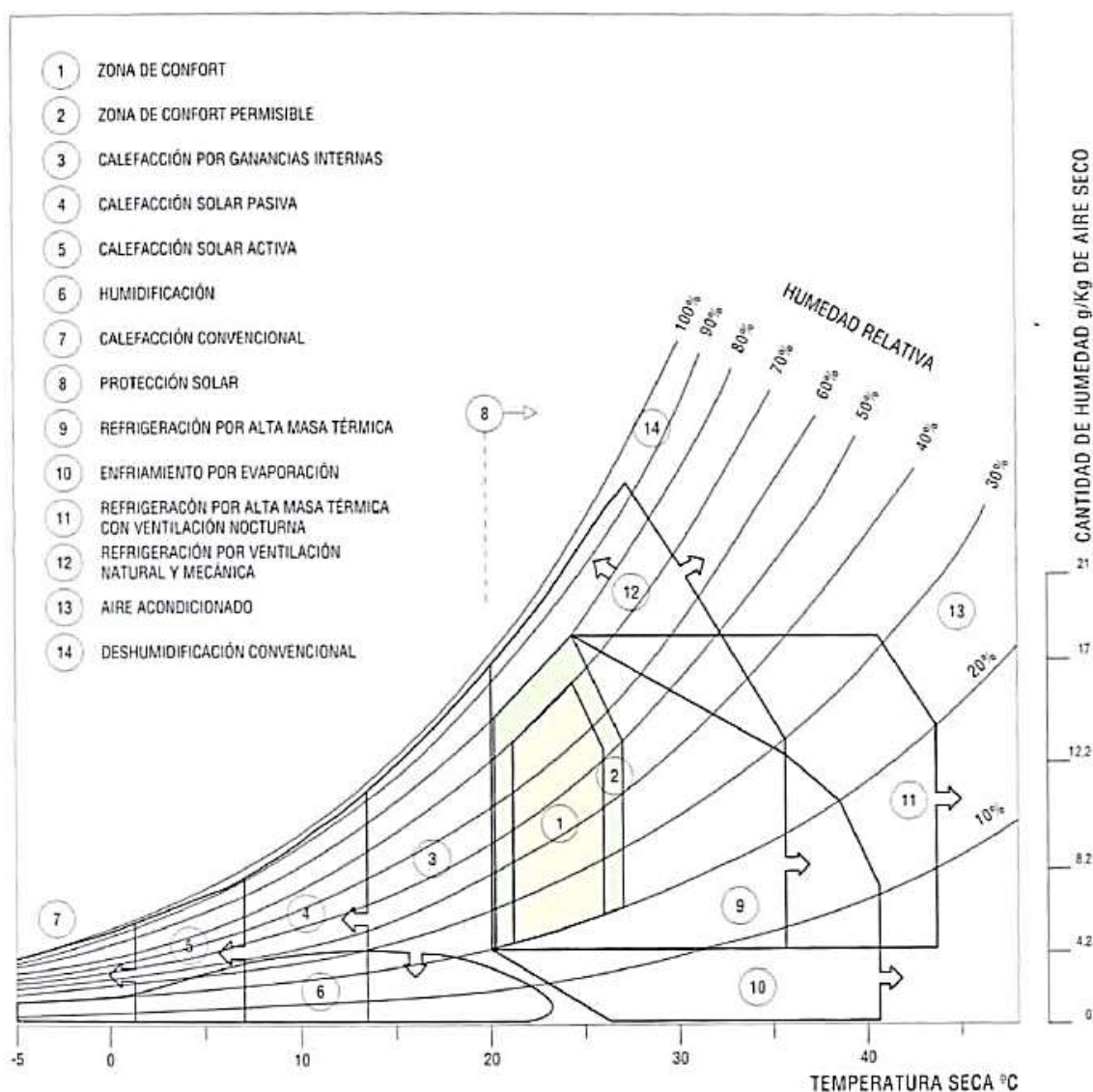
Se basa en el índice de tensión térmica (ITS) para delimitar la zona de bienestar, siendo muy adecuada su aplicación en climas cálidos de las regiones secas. En ésta se representan en el eje de abscisas las temperaturas de bulbo seco (normalmente la dan los observatorios) y en el de ordenadas se representa la tensión parcial de vapor de agua contenido en el aire. Se incluyen las líneas curvas, psicrométricas que representan la humedad relativa.

Al igual que la anterior, la representación del clima anual puede hacerse con las condiciones medias de cada mes, o mejor, con las condiciones de los días medios de cada mes, que representa la oscilación diaria de los parámetros temperatura-humedad.

Esta carta tiene en cuenta las características del edificio y la construcción como modificadoras de las condiciones del clima exterior, estableciendo recomendaciones para el bienestar en el interior de las edificaciones. En su interior se delimitan varias zonas con condiciones de temperatura y humedad que indican la conveniencia de utilizar unas determinadas estrategias de diseño en el edificio. Si hay zonas en las que se superponen distintas estrategias, se puede usar una, otra o la acción combinada del conjunto de las recomendadas.

Hay que tener en cuenta que las condiciones óptimas de diseño pasivo reducen la necesidad de uso de instalaciones mecánicas de acondicionamiento térmico de los espacios. Por ejemplo, si se necesita calefacción, un buen comportamiento pasivo colaborará en reducir la energía que el sistema pudiera utilizar en su funcionamiento.

Este tipo de carta se representa en la Fig.4.25



**Fig.4.25.** Diagrama de Givoni. Reproducido de la publicación (Jaime Lopez de Asiain, Rafael González Sandino, José María Cabeza Láinez, Margarita de Luxán García de Diego, Flavio Celis D'Amico, Fernando da Casa Martín, Ernesto Echevarría Valiente, 1997)

### 2.4.3 Aplicación a la geografía andaluza

En la publicación “Arquitectura y Clima en Andalucía: manual de diseño” (Jaime Lopez de Asiain, Rafael González Sandino, José María Cabeza Láinez, Margarita de Luxán García de Diego, Flavio Celis D'Amico, Fernando da Casa Martín, Ernesto Echevarría Valiente, 1997), se incorpora la aplicación de estas herramientas en 16 áreas de Andalucía, seleccionados como lugares más representativos en los que se pensaba en el momento de redacción de la misma que más se iba a desarrollar el crecimiento de la población y por tanto de la edificación.

Las zonas en las que clasifica el territorio se recogen en la Tabla 4.6 en la que se identifican las zonas analizadas y su correspondencia con la clasificación actual de zonas climáticas del CTE.

**Tabla 4.6.** Recomendaciones de “Arquitectura y Clima en Andalucía: manual de diseño” (Jaime Lopez de Asiaín, Rafael González Sandino, José María Cabeza Láinez, Margarita de Luxán García de Diego, Flavio Celis D'Amico, Fernando da Casa Martín, Ernesto Echevarría Valiente, 1997) para la zona climática A3

<b>ZONA según Arquitectura y Clima en Andalucía: manual de diseño</b> (Jaime Lopez de Asiaín, Rafael González Sandino, José María Cabeza Láinez, Margarita de Luxán García de Diego, Flavio Celis D'Amico, Fernando da Casa Martín, Ernesto Echevarría Valiente, 1997)		<b>ZC s/ CTE y DR AAE</b>
Cádiz: área de la Bahía de Cádiz.		
Algeciras-La Línea de la concepción: área del campo de Gibraltar.		A3
Málaga: área metropolitana de Málaga, costa		
Málaga: área metropolitana de Málaga, costa		
Huelva: área de influencia de Huelva		
Jerez de la frontera: municipio y área de influencia		
Sevilla: área metropolitana y zona de influencia		B4
Córdoba: área de influencia de Córdoba		
Gádor: área de influencia de Almería, interior		
Almería: área de influencia de Almería, costa		A4
Jaén: área de influencia de Jaén		C4
Linares: área de influencia de Linares y Mengibar		
Almogía-Casabermeja: área metropolitana de Málaga, zona de vertiente sur de la sierra		C3
Granada: área de influencia de Granada		
Sanlúcar de Barrameda: área de la desembocadura del Guadalquivir		B3
Vélez Málaga: área de la costa oriental de Málaga		

Del análisis del manual se observa cómo en éste se identifica la posibilidad de utilización de estrategias de VN para todas las zonas analizadas, especificando para cada caso si es suficiente con el aprovechamiento del régimen de brisas, o hay que realizar alguna consideración específica en el propio diseño del edificio.





### 3.- Caracterización de la necesidad de un SV alternativo

#### Resumen

Este apartado se estructura en cuatro puntos en los que se analiza la situación de la que surge la oportunidad y la necesidad de investigar en el campo en el que se desarrolla esta tesis doctoral. El primer punto se centra en conceptos generales relacionados con la normativa, la hermeticidad de la edificación y el impacto que produjo este enfoque en los edificios escolares a partir del año 2008. A continuación se analiza un conjunto de edificios escolares construidos en la última década, entrando en el detalle de las instalaciones de VM que se incorporaron en ellos. A partir de los datos de proyecto se evalúa el consumo energético en su funcionamiento, así como la emisión de CO<sub>2</sub> asociada. A continuación se identifican de manera específica los problemas asociados a la utilización de SVM en edificios escolares, estimándose el impacto en el área geográfica y climática que se analiza. Seguidamente se detallan los beneficios asociados a la utilización de SVN que hacen que se presente como una alternativa viable, factible y sostenible, y por último se enumeran las bases sobre las que definir una solución alternativa de ventilación y las exigencias técnicas que deberían cumplirse con ésta.

#### 3.- Caracterización de la necesidad de un SV alternativo

3.1 Origen de la necesidad de un SV alternativo .....	171
3.1.1 Hermeticidad vs ventilación .....	171
3.1.2 Los edificios no residenciales en el marco normativo español .....	171
3.1.3 Estudios previos de sistemas de ventilación en uso docente en Andalucía.....	172
3.1.4 Edificios escolares con SVM.....	173
3.2 Problemas asociados al uso de SVM en edificios escolares.....	175
3.2.1 Incremento de los costes .....	175
3.2.2 Incremento de las emisiones .....	176
3.2.3 Problemas asociados con la salubridad .....	176
3.2.4 Volumen e impacto .....	176
3.3 Viabilidad y ventajas de los SVN .....	177
3.3.1 Viabilidad .....	178
3.3.2 Ventajas .....	179
3.4 Bases para el planteamiento de una solución de ventilación alternativa .....	179
3.4.1 Exigencias Técnicas a satisfacer por los sistemas de ventilación.....	179
3.4.2 Consideraciones para el diseño de un sistema de ventilación .....	180

### 3.1 Origen de la necesidad de un SV alternativo

En Andalucía, en los espacios de uso docente, tradicionalmente se ha realizado el tratamiento térmico del aire (fundamentalmente calefacción), al igual que en otras localizaciones del norte de Europa (Department for Education UK, 2016; Department for Education and skills, 2006), quedando la ventilación de los espacios (y la salubridad y CAI) garantizada por las infiltraciones de la edificación y por una adecuada praxis en la forma de utilizar los espacios, renovando el aire mediante la apertura de puertas y ventanas en determinados momentos de la actividad diaria, así como con ventanas diseñadas de manera específica para facilitar la ventilación evitando corrientes de aire (Fig.4.26).



**Fig.4.26.** Ventanas específicamente diseñadas para ventilación en un centro educativo en Sevilla. (fuente: propia).

Las infiltraciones y los espacios ventilados naturalmente se encontraban contemplados en la normativa vigente en España hasta 2006, tanto para uso docente como para el resto de usos (Ministerio de Economía y Hacienda, Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, & Ministerio de Economía y Hacienda, 1998). Esta forma de proceder ha sido la habitual también en otras localizaciones tanto en clima mediterráneo como en climas más fríos.

#### 3.1.1 Hermeticidad vs ventilación

Como ya se ha visto en los capítulos anteriores, en la última década los reglamentos técnicos internacionales han promovido el incremento de la estanqueidad al aire y de la hermeticidad en los edificios, como medida para reducir las pérdidas de calor en invierno y mejorar su eficiencia energética reduciendo el gasto de energía asociado a las instalaciones de calefacción. También se ha visto cómo esta tendencia se deriva de los estudios realizados fundamentalmente en países fríos en los cuales la demanda energética debida a los requisitos de calefacción es muy elevada. Sin embargo, una mayor hermeticidad sin una adecuada ventilación puede derivarse en una reducción de los niveles de CAI, favoreciendo en ocasiones la aparición de mohos y condensaciones en el interior de los edificios, además de elevadas concentraciones de contaminantes. Debido a esto se hace necesario, a la vez que se aumenta la hermeticidad, regular normativamente los niveles de ventilación necesarios para garantizar la salubridad interior. Por otro lado y como contrapartida negativa del exceso de hermeticidad en las edificaciones, actualmente se está documentando el sobrecalentamiento de los edificios en las estaciones fuera del invierno, lo cual lleva a que sean necesarios sistemas de refrigeración incluso en países de clima frío.

#### 3.1.2 Los edificios no residenciales en el marco normativo español

De esta tendencia se hizo eco también la norma española con la publicación del CTE y el DBHS para regular la salubridad de los espacios, pero sólo en el ámbito de los edificios de uso no residencial, remitiendo al Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE 2007) (Ministerio de la Presidencia, 2007) para el análisis de este aspecto en otros tipos de edificio. Entrando en el detalle de este reglamento, el propio título: "Reglamento de Instalaciones Térmicas", sugiere la presunción por parte de la normativa de que los edificios no residenciales van a incluir estas instalaciones en todo caso. Si además profundizamos en el apartado específico de la ventilación, comprobamos cómo las Instrucciones Técnicas (IT) que desarrolla el RITE, se basan en la UNE-EN 13779 (AENOR, 2005) "Ventilación de edificios no residenciales". A su vez, la UNE-EN 13779 establece que los edificios ventilados naturalmente están fuera de su objeto y campo de aplicación. De lo anterior se desprende que la normativa española actual supone con estas consideraciones que los edificios de uso no residencial incluyen UTAs

(y que no están ventilados naturalmente), y que por tanto, la ventilación se realizará con sistemas mecánicos, obligando de manera indirecta a incluir este tipo de sistemas en los edificios no residenciales. Por contraposición, en edificación residencial, el CTE (Ministerio de vivienda, 2006) considera que la ventilación de los espacios, independientemente de que tengan determinado grado de estanqueidad, se realiza por otros medios como la ventilación natural o híbrida.

Como tanto el RITE como el CTE son normas de carácter prestacional y no prescriptivo, no pueden establecer la exigencia de implementación de una tecnología determinada en los edificios, por lo que contemplan la posibilidad de utilización de soluciones alternativas. Sin embargo, el RITE sólo desarrolla en sus IT soluciones de VM y no desarrolla ninguna solución alternativa. **En este punto es donde surge la necesidad y oportunidad de esta investigación** en cuanto a la definición y desarrollo de soluciones de ventilación alternativas a las mecánicas.

### 3.1.3 Estudios previos de sistemas de ventilación en uso docente en Andalucía

Con los antecedentes descritos en el apartado anterior, en el marco de los edificios de uso educativo en Andalucía, el uso de las instalaciones de VM comenzó a llevarse a cabo desde la entrada en vigor del RITE 2007. Dados el impacto y la trascendencia de la inclusión de estos sistemas en la forma de diseñar y utilizar los edificios de uso docente, la Consejería de Educación (C. de E. Junta de Andalucía, n.d.) encargó un estudio sobre la repercusión de la aplicación de estos sistemas a los nuevos edificios escolares (“Proyecto Academia Estudio comparativo de sistemas de calefacción y climatización en los proyectos de centros docentes en Andalucía, fase I y fase II” (Grupo TEP 130, n.d.”).

El proyecto resumía entre sus conclusiones finales los siguientes aspectos más relevantes:

- I. *“... para cumplir el vigente RITE, y sin entrar aún en la conveniencia de dotar a los edificios docentes de una instalación de climatización que atienda a las demandas de calefacción y refrigeración que se producen a lo largo de todo el año, **habría que modificar el criterio hasta ahora establecido de equipar a los edificios docentes con una instalación de calefacción centralizada con radiadores por otra que incluya además la ventilación mecánica** mediante climatizadores de aire primario neutro ...”*
- II. *“La mejora de las condiciones ambientales, principalmente la de calidad de aire interior, lleva aparejada un mayor coste energético, de inversión de equipos y de explotación anual, que se han cuantificado para su valoración y consideración.”*
- III. *“En las zonas climáticas C y D serán necesarios habitualmente humidificadores para mantener las condiciones de humedad relativa en los términos establecidos en el RITE. Eso lógicamente supone un sobre coste energético y económico (en costes de inversión pero sobre todo de explotación) que hemos valorado. Si bien, sobre todo desde un punto de vista energético, dan mejores resultados, aunque ligeramente, los humidificadores adiabáticos, recomendamos optar por los de vapor por ofrecer una mayor seguridad en el mantenimiento de las condiciones de salubridad a lo largo del ciclo de vida.”*

El estudio ofrecía también como principales resultados un importante incremento de la inversión inicial, de los consumos y emisiones, así como del gasto de funcionamiento y mantenimiento a lo largo de la vida útil del edificio.

El desarrollo del proyecto Academia se centraba en la aplicación directa de las IT del RITE, que a su vez se basan, como hemos comentado, en la exclusiva utilización de medios mecánicos para garantizar la CAI, en el marco de las Instalaciones Térmicas. A los problemas asociados al incremento de inversión y de consumo podía añadirse el potencial problema que podría suponer para la salubridad el que no se realizase un adecuado mantenimiento de los conductos de suministro de aire. Al margen de esto y hasta no disponer de una solución alternativa, comenzó a implantarse, tal como recomendaba el estudio, este tipo de SVM para garantizar la CAI en los edificios escolares.

Como resultado de su aplicación, se ha constatado en los últimos 10 años el hecho de que este tipo de solución mecánica está presentando numerosos problemas. De la misma manera, e independientemente del coste económico, si no se lleva a cabo el mantenimiento adecuado, estos sistemas suponen un potencial problema de salubridad para los usuarios, no dando respuesta a los requerimientos de Calidad de Aire Interior necesarios. Adicionalmente debe subrayarse la cuestión relacionada con el consumo de energía, que es eléctrico, lo cual conlleva importantes emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas, además de la incidencia en el gasto operacional del edificio a lo largo de toda su vida útil. No obstante, el propio RITE en su articulado, y dado que, al igual que el CTE es una norma prescriptiva y no prestacional, posibilita la utilización de soluciones alternativas que se aparten total o parcialmente de las soluciones desarrolladas en las IT, siempre que se cumplan las exigencias técnicas del articulado. Esta cuestión es a la que se da respuesta con la investigación desarrollada en esta tesis.

### 3.1.4 Edificios escolares con SVM

Los resultados del estudio teórico anterior (inversión inicial, consumo eléctrico, emisiones...) se han podido contrastar en la práctica con el análisis de los SVM diseñados en casos reales de proyectos de edificios escolares. A continuación se presentan las características de 10 edificios construidos y en funcionamiento actualmente, en los que se incluyó un SVM para garantizar la CAI.

**Datos de proyecto.** Se analizan 10 centros escolares construidos en la última década siguiendo las prescripciones y recomendaciones que realizaba el proyecto Academia para la garantía de la CAI de los espacios de uso docente. La selección se realiza con criterios de diversidad en cuanto al modelo de centro, superficie y zona climática. La tipología generalista es la de educación infantil y primaria, por ser el tipo de centros mayoritario del parque. Las características de los edificios y el presupuesto de ejecución material (PEM) de las obras y de los SVM se recogen en la Tabla 4.7.

**Tabla 4.7.** Resumen de datos del proyecto de los 10 casos analizados

	Tipo	ZC	Sup const (m²)	Nº alum	PEM total	PEM SVM
E 1	C2SD1	B3	3.105,48	450	2.226.915,93	60.113,09
E 2	C3	C4	4.363,41	675	3.100.798,31	196.687,37
E 3	A3	A3	1.306,30	225	1.217.739,02	37.680,67
E 4	C2	B3	2.990,04	450	2.431.918,46	105.667,86
E 5	C2	C3	2.958,03	450	2.552.851,24	115.818,48
E 6	C3	C3	4.401,07	675	3.660.285,80	62.371,85
E 7	C2	B3	3.080,59	450	2.425.987,54	120.267,90
E 8	D3	B4	3.283,28	360	2.790.296,54	157.643,08
E 9	C2	B3	3.375,34	450	2.883.119,36	85.851,47
E 10	C3	B3	4.690,85	450	2.090.453,86	172.570,08

Todos ellos coinciden en disponer un SVM diseñado en líneas generales de manera similar: Una doble red de conductos (de impulsión y retorno) conecta el espacio interior con una UTA dispuesta en cubierta. En esta UTA se disponen distintas secciones de filtros, baterías de calor, recuperadores de calor, by-pass para free-cooling, etc... según el diseño de cada uno. En general, se ha evitado la disposición de elementos de humectación del aire tipo "lanza de vapor", por el potencial problema asociado a la legionela. Los datos técnicos detallados se muestran en la Tabla 4.8., donde también se recogen los datos relativos al tiempo de funcionamiento estimado de la instalación.

**Tabla 4.8.** Resumen de datos de técnicos de los SVM de proyecto de los 10 casos analizados

	Tipo caldera	Potencia caldera (Kw)	ODA	IDA	Caudal estimado (m³/h)	nº UTAS	Consumo UTA	Tipo de control	Ventiladores	Recuperador	Potencia motores	UTAS de Baterías de calor	Horas de funcionamiento
E 1	biomasa	240	2	2 y 3	21.600	1	elect.	C3	impulsión / retorno	sí	16,83	sí	905
E 2	gas natural	250	2	2 y 3	41.590	6	elect.	C3	impulsión / retorno	sí	22,55	sí	905
E 3	gas natural	115,9	2	2 y 3	14.250	2	elect.	C3	impulsión / retorno	sí	10,83	sí	905
E 4	gas natural	116	4	2 y 3	22.620	12	elect.	C3	impulsión / retorno	sí	9,35	sí	905
E 5	biomasa	350	4	2	31.800,63	11	elect.	C3	impulsión / retorno	sí	26,20	sí	905
E 6	biomasa	150	2	2 y 3	34.740	6	elect.	C3	impulsión / retorno	sí	13,54	no	905
E 7	gas natural	180	2	2 y 3	36.871	7	elect.	C1	impulsión / retorno	sí	31,70	no	905
E 8	gasóleo	240	2	2 y 3	32.600	3	elect.	C3	impulsión / retorno	sí	25,16	si	905
E 9	gasóleo	290,7	2	2 y 3	38.655	4	elect.	C1	impulsión / retorno	sí	19,46	no	905
E 10	gasóleo	no hay datos	2	2 y 3	47.295	19	elect.	C3	impulsión / retorno	sí	27,19	si	905

En la Tabla 4.8 se puede observar el importante impacto en el coste de inversión inicial asociado a la instalación de VM. Así mismo, analizando los datos de la Tabla 4.8 conjuntamente con los de la Tabla 4.7, vemos que las superficies de los centros oscilan entre los 1.300 m<sup>2</sup> y los 4.700 m<sup>2</sup> construidos. A su vez los costes asociados a los SVM se encuentran entre los 37.680,67 € y los 172.570,08 € para inversiones totales de 1.217.739,02 € y los 2.090.453,86 € respectivamente, lo que supone un 3% y un 8,25% del PEM del edificio debido sólo a esta instalación. A las cantidades anteriores de inversión inicial habría que añadirles el mayor coste de la instalación eléctrica y la disposición de un centro de transformación, que será necesario debido al notable incremento de la potencia eléctrica necesaria que supone el SVM. Estos sobrecostes pueden estimarse en torno a unos 30.000 euros más.

**Estimación de consumos y costes.** Con estos datos de los proyectos se analizan los consumos de energía que pueden estimarse en estos edificios, derivados de las características técnicas de las máquinas. Estos se reflejan en la Tabla 4.9. Como elementos consumidores de la instalación se identifican los siguientes: i) Motores de las UTAS, que consumen energía eléctrica; ii) Batería de Calor, que consume el mismo combustible que la caldera de calefacción (gas natural, biomasa o gas oil) y iii) 7 de las 10 instalaciones disponen de recuperadores de calor.

Aplicando los coeficientes oficialmente publicados relativos a la conversión en términos de energía primaria y emisiones de CO<sub>2</sub>, se obtienen estos valores para cada uno de los edificios. Los resultados que se obtienen están recogidos en la Tabla 4.9 para el conjunto de proyectos analizado. No ha sido posible contrastarlos en la práctica, dado que los centros no suelen poner en marcha estas instalaciones en su funcionamiento habitual, por el excesivo coste de electricidad que suponen y la complejidad de su mantenimiento. Así mismo el usuario no lo utiliza debido a que suelen tener otros hábitos para ventilar el aula.

**Tabla 4.9.** Estimación de consumos debidos al funcionamiento de los SVM diseñados en diversos edificios de uso escolar

	Consumo eléctrico anual energía final	Consumo batería calor anual energía final	CONSUMO ENERGÍA FINAL total anual SVM	Consumo eléctrico anual energía primaria UTA	Consumo anual energía primaria BATERÍA CALOR	CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA total anual SVM	Emisión CO <sub>2</sub> anual electricidad UTA	Emisión CO <sub>2</sub> anual BATERÍA CALOR	EMISIÓN CO <sub>2</sub> total anual debido al SVM	Ratio de consumo eléctrico	Ratio de consumo batería calor Consumo total	ENERGÍA FINAL SVM
E 1	15.235,50	10.874,95	26.110,45	37.494,57	12.103,82	49.598,38	14.960,33	217,87	15.178,20	4,91	3,5	8,41
E 2	20.411,63	21.158,15	41.569,78	50.233,02	25.283,99	75.517,01	20.042,98	6.371,57	26.414,54	4,68	4,85	9,53
E 3	9.801,15	9.351,20	19.152,35	24.120,63	11.174,68	35.295,31	9.624,13	2.816,02	12.440,15	7,5	7,16	14,66
E 4	8.461,75	14.588,05	23.049,80	20.824,37	17.432,72	38.257,09	8.308,92	4.393,05	12.701,97	2,83	4,88	7,71
E 5	23.711,00	26.239,92	49.950,92	58.352,77	29.205,03	87.557,80	23.282,76	525,69	23.808,45	8,02	8,87	16,89
E 6	12.255,51	0	12.255,51	30.160,81	0	30.160,81	12.034,16	0	12.034,16	2,78	0	2,78
E 7	28.688,50	0	28.688,50	70.602,40	0	70.602,40	28.170,36	0	28.170,36	9,31	0	9,31
E 8	22.770,13	18.171,00	40.941,13	56.037,29	21.478,12	77.515,41	22.358,88	6.679,70	29.038,57	6,94	5,53	12,47
E 9	17.608,59	0	17.608,59	43.334,74	0	43.334,74	17.290,56	0	17.290,56	5,22	0	5,22
E 10	24.610,57	33.785,99	58.396,56	60.566,61	39.935,04	100.501,65	24.166,08	12.419,80	36.585,88	5,25	7,2	12,45
	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kg)	(kg)	(kg)	(kWh/m <sup>2</sup> Año)	construid año	(kWh/m <sup>2</sup> año)

En la Tabla 4.9 se observa cómo el ratio de consumo del SVM se encuentra en valores entre los 5,22 y los 16,89 kwh/m<sup>2</sup> y año.

## 3.2 Problemas asociados al uso de SVM en edificios escolares

### 3.2.1 Incremento de los costes

**Inversión inicial.** Como ya se ha visto, se produce un importante incremento del coste de ejecución de las obras, ya que aproximadamente el 10% del PEM del proyecto se destina a esta instalación. El origen de este coste es debido a:

- Coste de la instalación (UTAS, conductos, etc..) Se ha estimado en la muestra analizada entre el 3 y el 8,25%
- Incremento del coste de la instalación eléctrica debido al aumento de potencia que conlleva la puesta en funcionamiento de esta instalación, con la necesidad adicional de una acometida de mayor capacidad y la disposición, en la mayoría de los casos, de un centro de transformación. Se ha estimado en el entorno de los 30.000 €.

**Coste de funcionamiento.** Se compone del coste de funcionamiento asociado al gasto en combustible y energía y el coste de mantenimiento obligatorio anual.

- Coste operacional: La estimación de coste operacional anual en euros de estos SVM, sin incluir mantenimiento, se ha calculado en base al consumo de cada uno de los elementos consumidores de energía asociados al funcionamiento de la instalación de VM. Estos son los motores de las UTAS y las baterías de calor.

A cada uno de ellos se le ha aplicado el coste del combustible correspondiente, que según los datos publicados por las compañías suministradoras en 2019, según la Tabla 4.10. Los resultados obtenidos de coste operacional anual y a 30 años se reflejan en la Tabla 4.11.

**Tabla 4.10.** Coste por tipo de combustible  
Fuente: compañías

TIPO DE COMBUSTIBLE	COSTE (€/kWh)
Electricidad	0,1112
Gasóleo	0,0727
Gas natural	0,05
Biomasa	0,016

**Tabla 4.11.** Estimación de coste anual y a 30 años en € debido al consumo de energía asociada a los SVM en edificios de uso escolar

CENTRO	COSTE (€) ANUAL	COSTE (€) (30 AÑOS)
E 1	1.868,19	56.045,60
E 2	3.327,68	99.830,42
E 3	1.557,45	46.723,44
E 4	1.670,35	50.110,47
E 5	3.056,50	91.695,06
E 6	1.362,81	40.884,38
E 7	3.190,16	95.704,84
E 8	3.853,07	115.592,10
E 9	1.958,08	58.742,26
E 10	5.192,94	155.788,11

Se comprueba cómo los centros analizados, si hiciesen un uso pleno de estos sistemas, deberían gastar entre 1.300 y 5.200 € anuales en la energía necesaria para la operación de este SVM, que, a 30 años supondría entre los 40.000 y los más de 150.000 €. A esto hay que añadir el coste que debería asumir el centro escolar a lo largo de toda su vida útil por el hecho de tener un término fijo de potencia contratado muy superior al que tendría en ausencia de esta instalación.

- Coste de mantenimiento: Los SVM son sistemas complejos que conllevan elevados costes asociados al mantenimiento. Además, el mantenimiento en relación a la limpieza de filtros y conductos está directamente relacionado con la salubridad. El proyecto Academia estimaba estos costes en el entorno de los 2.250 € anuales de media.



### 3.2.2 Incremento de las emisiones

El mayor consumo de energía conlleva un importante incremento de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas. En la Tabla 4.12 se reflejan las emisiones anuales asociadas al funcionamiento teórico de la instalación. Los valores utilizados para el cálculo son los coeficientes de paso oficialmente publicados resumidos en la Tabla 4.13.

CENTRO	CO <sub>2</sub> EMITIDO (kg) ANUAL	CO <sub>2</sub> EMITIDO (kg) (30 AÑOS)
E 1	15.178,20	455.346,01
E 2	26.414,54	792.436,23
E 3	12.440,15	373.204,55
E 4	12.701,97	381.059,03
E 5	23.808,45	714.253,39
E 6	12.034,16	361.024,90
E 7	28.170,36	845.110,71
E 8	29.038,57	871.157,24
E 9	17.290,56	518.716,84
E 10	36.585,88	1.097.576,28

**Tabla 4.12.** CO<sub>2</sub> emitido en kg al año y a 30 años por centro educativo usando un SVM

	COEF. PASO ENERGÍA PRIMARIA	COEF. PASO EMISIONES DE CO <sub>2</sub>
Electricidad	2,461	0,399
Gasoleo	1,182	0,311
Gas natural	1,195	0,252
Biomasa	1,113	0,018

**Tabla 4.13.** CO<sub>2</sub> emitido en kg al año y a 30 años por centro educativo usando un SVM

Según se refleja en la Tabla 4.12, las emisiones anuales asociadas sólo al funcionamiento de esta instalación se encuentran entre las 12 y las 36,5 Toneladas de CO<sub>2</sub> anuales por edificio, que en una proyección a 30 años supondrían entre las 361 y las 1.097 Toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas a la atmósfera.

### 3.2.3 Problemas asociados con la salubridad

Por último, y no por ello menos importante, se conoce la problemática que se asocia en determinados casos a las instalaciones de VM insuficientemente mantenidas, denominada “síndrome del edificio enfermo”. Según el proyecto Academia (Grupo TEP 130, n.d.), el mantenimiento de revisión de filtros, conductos y demás elementos es necesario realizarlo 3 veces al año.

### 3.2.4 Volumen e impacto

**Ámbito nacional.** Como ya se ha mencionado, el presente estudio se centra en los edificios escolares del parque público andaluz. El número de edificios públicos de uso escolar de educación no universitaria supera los 4.500 centros, muchos de ellos con más de un edificio, por lo que el número de edificios está en el entorno de 6.000 (CEJA, n.d.). El grupo más numeroso es el de los CEIP, con 2012 centros, y un peso del 43% del parque construido. Analizando el volumen de centros en función del titular, el 64% (2.969 centros) del total de 4.673, son propiedad de los Ayuntamientos, los cuales son los responsables de su funcionamiento, mantenimiento y conservación.

Por otro lado, el parque existente se encuentra prácticamente consolidado en número, por lo que el volumen de centros nuevos que se construyan previsiblemente será mínimo en los próximos años, siendo necesarias actuaciones de modernización en muchos de ellos, o de sustitución de aquéllos que hayan llegado al final de su vida útil. En cualquier caso, en ambos tipos de actuaciones, deberán estar presentes los principios de sostenibilidad y eficiencia energética, además de los específicos asociados al uso educativo.



Dado el volumen del parque en el que se centra la investigación, el impacto que tendría la utilización de estos SVM en centros nuevos, sería, promediando los resultados del análisis expuesto (Tabla 4.10 a Tabla 4.13) el reflejado en las Tablas 4.14 y Tabla 4.15 en términos de consumo de energía y emisiones.

CONSUMO ENERGÍA FINAL del SVM total anual	31.772,36 kWh
CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA del SVM total anual	60.834,06 kWh
EMISIÓN CO <sub>2</sub> debido al SVM total anual	21.366,28 kg
Consumo total ENERGÍA FINAL SVM/m <sup>2</sup> sup construida	9,94 kWh/m <sup>2</sup> año

**Tabla 4.14.** Condiciones de diseño de SVM en edificios de uso escolar (promedios de los obtenidos de casos reales de la Tabla 8)

Extrapolando los datos representados en la Tabla 4.14 y suponiendo que se produjese una renovación del 25% parque en los próximos años, el impacto anual de este tipo de instalación en centros nuevos sería del orden de lo recogido en la Tabla 4.15.

CONSUMO ENERGÍA FINAL del SVM total anual	37.118.058,40 kWh
CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA del SVM total anual	71.069.391,95 kWh
EMISIÓN CO <sub>2</sub> debido al SVM total anual	24.961.161,17 kg

**Tabla 4.15.** Consumo de energía debido a SVM en una renovación del 25% de parque edificado en Andalucía.

**Ámbito Mediterráneo.** En el ámbito Mediterráneo, donde se estima un volumen del parque de más de 80.000 edificios, si aplicando un análisis similar se sustituyese el 25% del parque, la cuantificación sería la que se refleja en la Tabla 4.16.

CONSUMO ENERGÍA FINAL del SVM total anual	635.447.180,00 kWh
CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA del SVM total anual	1.216.681.223,24 kWh
EMISIÓN CO <sub>2</sub> debido al SVM total anual	427.325.678,05 kg

**Tabla 4.16.** Consumo de energía debido a SVM en una renovación del 25% de parque edificado en zona mediterránea

Con los resultados obtenidos se verifica el enorme impacto que supone la implantación de estos sistemas desde el enfoque de las inversiones, los consumos de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Existe un último factor, no cuantificable en los casos analizados, que es de los problemas de salubridad asociados a la falta de mantenimiento, dado que no se ponen en uso en la práctica, por diversos motivos.

Por tanto, queda suficientemente motivado que es necesario articular una solución alternativa a la desarrollada en el apartado de Instrucciones técnicas del RITE 2007 para ventilar adecuadamente los edificios escolares por dos motivos fundamentales: i) Los sistemas mecánicos se han mostrado inadecuados para proporcionar una adecuada ventilación en este tipo de edificio, ii) supondrían un elevado impacto en el consumo de energía, emisiones asociadas.

### 3.3 Viabilidad y ventajas de los SVN

Como se ha mostrado en el Estado del Arte, los SVN constituyen una oportunidad para la mejora de los edificios de uso escolar en los países de la cuenca Mediterránea. Igualmente, esto es de aplicación al caso de Andalucía.

Sin embargo, también se ha visto que en la normativa técnica aplicable a la edificación y la enseñanza de la arquitectura y la ingeniería, no se encuentran desarrolladas las materias relacionadas con esta tecnología, en contraposición con la extensa bibliografía existente así como manuales y asignaturas académicas en las que se desarrolla el cálculo de sistemas mecánicos de acondicionamiento. Esto supone la oportunidad de desarrollar un ámbito técnico y tecnológico centrado específicamente a los SVN así como soluciones que puedan emplearse tanto en estrategias de calidad del aire como de refrigeración pasiva, especialmente en el ámbito climático y geográfico en el que se centra este estudio.

### 3.3.1 Viabilidad

La viabilidad de aplicación de los SVN a los edificios escolares se resume en los siguientes puntos principales:

La tipología de los edificios de uso docente se desarrolla por su propia naturaleza de funcionamiento y lógica organizativa de los espacios del siguiente modo: i) triple crujía habitualmente por mayor compacidad; ii) fondo del aula limitado; iii) grandes ventanales y iv) disposición en grandes parcelas en zonas expuestas al viento en la periferia urbana, por lo que cumplen con los requisitos que hay que tener en cuenta en las etapas primeras del diseño de SVN en edificios. Observando la implantación de los edificios con SVM anteriormente analizamos, se aprecia que Los centros escolares analizados (y todos los nuevos en general) se ubican en parcelas de grandes dimensiones en el extrarradio de las zonas urbanizadas, tal como se representa en la Fig.4.27.

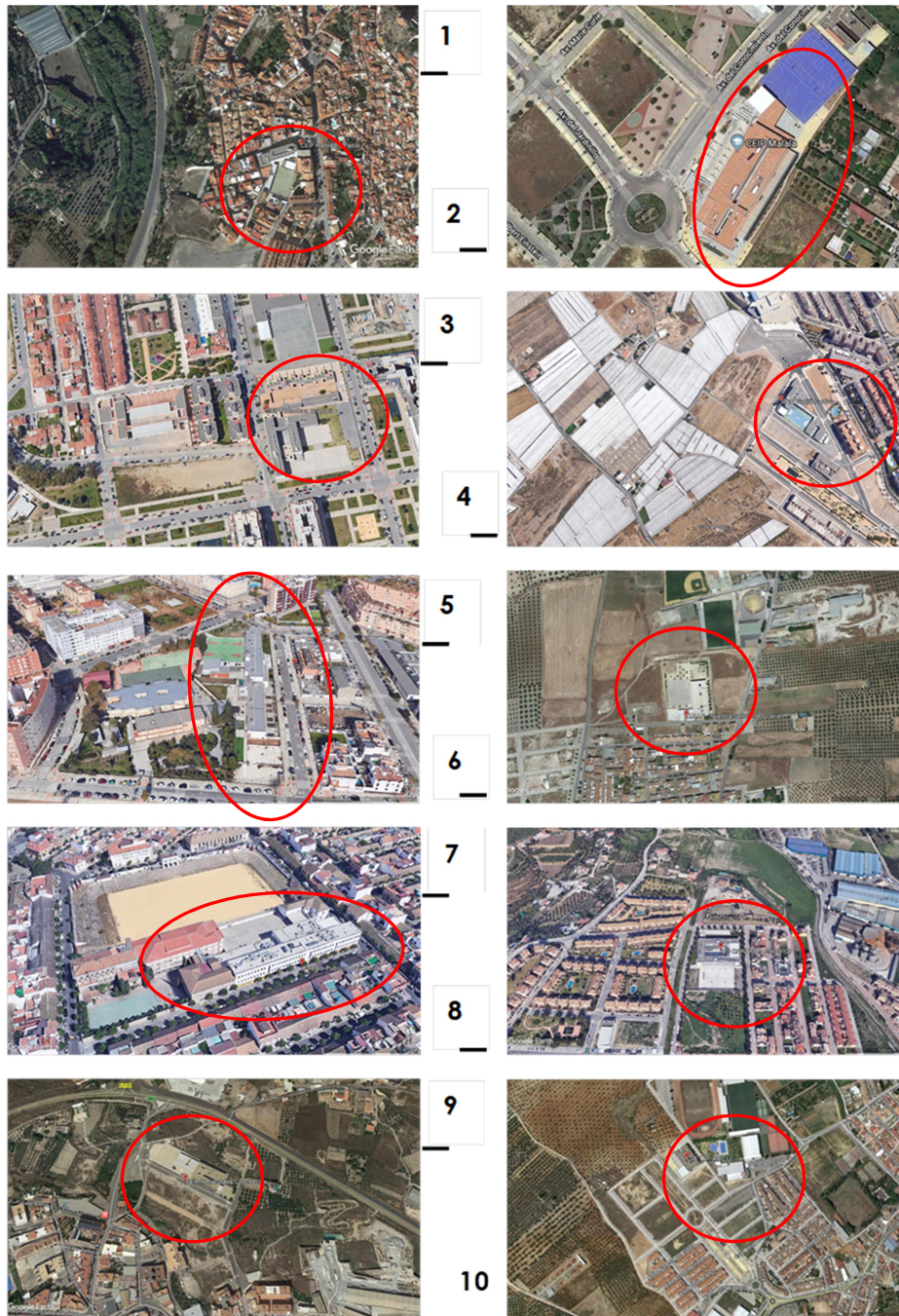


Fig.4.27. Implantación de los 10 casos analizados (fuente: propia e imágenes aéreas obtenidas de google maps)

En la Fig.4.27 se muestra la ubicación de los solares, en zonas abiertas de las ciudades, o incluso en zonas rurales. En estos la CAE y la exposición a los vientos dominantes se encuentran garantizadas.

1. Según se ha visto en el apartado anterior de este capítulo, en época de invierno, la temperatura mínima media en el horario lectivo no está nunca por debajo de los 4°C a primera hora de la mañana, encontrándose a partir de las 11:00 siempre por encima de los 10°C.
2. En época de estaciones intermedias que no sean invierno ni verano, no es necesario poner en funcionamiento el sistema de calefacción, por lo que realizar la ventilación de los espacios con el aire del exterior es perfectamente viable.
3. En época de verano, en los edificios de uso docente no hay clase, por lo que las temperaturas más elevadas del año no se producen durante el uso de estos espacios. Las condiciones de contorno por tanto, deberán estudiarse de manera específica, no siendo aplicables las condiciones generales de temperaturas pico aplicables a otro tipo de usos. La ventilación puede utilizarse como estrategia de refrigeración pasiva, reduciendo el sobrecalentamiento de los espacios mediante la introducción de aire del exterior, siempre que este se encuentre por debajo de una temperatura determinada. Además, aplicando criterios de confort adaptativo, la temperatura de confort varía a lo largo del año en función de las temperaturas exteriores.

### 3.3.2 Ventajas

A la vista de las evidencias y los datos analizados hasta el momento, se puede realizar la conclusión preliminar de que los SVN pueden ser factibles y viables en los edificios escolares de Andalucía y por extensión en el resto de zonas del ámbito Mediterráneo, suponiendo una alternativa para el diseño de edificios más sostenibles que cumplan con los requisitos marcados por la normativa internacional con el objetivo de combatir el cambio climático. Además, estos sistemas presentan otras ventajas, entre las que se pueden enumerar las siguientes:

1. El coste de la instalación es menor que el de los SVM.
2. Al no presentar consumo de energía, no conlleva costes de funcionamiento.
3. Al no consumir energía, no produce emisiones de CO<sub>2</sub>.
4. No producen ruido en su funcionamiento, lo que sí sucede con los sistemas mecánicos.
5. No requieren mantenimiento.
6. Son más saludables, ya que no depende del adecuado mantenimiento o sustitución de los filtros existentes en las UTAS.
7. Son sistemas que se pueden automatizar en su funcionamiento mediante sondas de CO<sub>2</sub> o temperatura y humedad.
8. Son capaces de proporcionar ventilación nocturna en la época más cálida, mejorando el confort térmico del espacio interior.

## 3.4 Bases para el planteamiento de una solución de ventilación alternativa

En este apartado se analizan en primer lugar las exigencias técnicas que debe satisfacer una instalación de ventilación (según la normativa actualmente vigente en España) para a continuación y en base a lo anterior, plantear las consideraciones en las que se fundamente el diseño del SVN.

### 3.4.1 Exigencias Técnicas a satisfacer por los sistemas de ventilación

Para el diseño de un SV alternativo a los SVM deben definirse las exigencias técnicas a las que deberá dar respuesta. A falta de una norma nacional específica de calidad del aire en edificios escolares, se toman como referencia las exigencias técnicas que establece el RITE 2007 (Ministerio de la Presidencia, 2007) en sus artículos 10 y 11 y que se resumen en la Tabla 4.17.



**Tabla 4.17.** Resumen de las exigencias técnicas que deben cumplirse según los artículos 10 y 11 del RITE 2007

<b>Bienestar e higiene</b>	Calidad térmica del ambiente	Mantener los parámetros del ambiente térmico dentro de un intervalos determinados para unas condiciones ambientales confortables
	Calidad del Aire Interior	Calidad del aire interior aceptable, en los <b>locales ocupados por las personas, eliminando los contaminantes que se produzcan de forma habitual durante el uso normal de los mismos</b> , aportando un caudal suficiente de aire exterior y garantizando la extracción y expulsión del aire viciado
	Higiene	Proporcionar una dotación de agua caliente sanitaria, en condiciones adecuadas, para la higiene de las personas
	Calidad del ambiente acústico	Limitación en condiciones normales de utilización el riesgo de molestias o enfermedades producidas por el ruido y las vibraciones de las instalaciones térmicas
<b>Eficiencia energética</b> <b>Procedimiento alternativo para su justificación (IT1.2.2.2):</b> consistirá en la adopción de soluciones alternativas, entendidas como aquellas que se apartan parcial o totalmente de las propuestas de esta sección, basadas en la limitación directa del consumo energético de la instalación térmica diseñada.	Rendimiento energético	Las prestaciones de los equipos estarán cercanas al régimen de rendimiento máximo
	Distribución de calor y frío	Los equipos y conducciones irán aislados
	Regulación y control	Para que las instalaciones puedan ajustar los consumos a las variaciones de demanda térmica así como interrumpir el servicio
	Contabilización de consumos	Para que el usuario conozca el consumo de energía
	Recuperación de energía	Subsistemas que permitan el ahorro, la recuperación de energía y el aprovechamiento de energías residuales
	Utilización de energías renovables	Aprovecharán las energías renovables disponibles, con el objetivo de cubrir con estas energías una parte de las necesidades del edificio
<b>Seguridad</b>	Se prevenga y reduzca a límites aceptables el riesgo de sufrir accidentes, siniestros, molestias o enfermedades	

Aunque debe tenerse en cuenta que el RITE (Ministerio de la Presidencia, 2007) no es una norma que analice y regule la CAI, sino que establece los requisitos de diseño de las Instalaciones Térmicas en los Edificios, en ausencia de otra norma de Calidad del Aire específica a la que se pueda hacer referencia, se suelen utilizar sus parámetros para determinar condiciones de CAI en uso no residencial, ya que, como se ha comentado en apartados anteriores el ámbito de aplicación del CTE y el DBHS es el uso residencial. En cualquier caso, cabe señalar que los artículos a los que se hace referencia (10 y 11) no cuantifican numéricamente las prestaciones, sino que las definen en términos generalistas como “suficiente”, “adecuados”, etc...tal como se resumen en la Tabla 4.17.

Según el artículo 14.2 b) del RITE, pueden adoptarse soluciones alternativas, entendidas como aquellas que se apartan total o parcialmente de las IT, siempre que se justifique que la instalación diseñada satisface las exigencias porque sus prestaciones son, al menos, equivalentes a las que se obtendrían por la aplicación de las soluciones basadas en las soluciones técnicas. Por tanto, si con los SVN, se da respuesta a los requerimientos establecidos en la Tabla 4.17, se estaría cumpliendo con los requisitos que establece el RITE para la validación del Sistema Alternativo. Además, la solución debe ir en consonancia con las directivas europeas de eficiencia energética en los edificios, reduciendo el consumo de los edificios durante su uso habitual, el consumo eléctrico y tener en consideración las condiciones climáticas del entorno.

### 3.4.2 Consideraciones para el diseño de un sistema de ventilación

Otras consideraciones a tener en cuenta antes del diseño de un sistema de ventilación se recogen en la Tabla 4.18.

**Tabla 4.18.** Resumen de consideraciones a tener en cuenta antes del diseño de un SVN en un edificio escolar

---

1.	Las aulas son espacios de elevada densidad de ocupación donde es necesario controlar la CAI para garantizar la salubridad y favorecer el aprendizaje.
2.	La OMS identifica los principales contaminantes de los espacios interiores, siendo el CO <sub>2</sub> un indicador de la CAI, pero no un contaminante en sí mismo.
3.	Es previsible que el nivel de CO <sub>2</sub> en las aulas sea alto, al ser espacios de alta densidad de ocupación, especialmente en ausencia de un adecuado régimen de ventilación.
4.	La CAI se controla reduciendo los contaminantes por dos medios que deben utilizarse sucesivamente, en primer lugar eliminando o reduciendo las fuentes de emisiones y en segundo lugar renovando el aire interior e introduciendo aire del exterior con una adecuada ventilación.
5.	Existen diversos sistemas de ventilación que pueden emplearse en los edificios. BB 101 (2016) [17]
6.	En los edificios de uso docente, la utilización de SVM puede tener un efecto negativo en la CAI. (referencias varias)
7.	En general, los materiales en la construcción y mobiliario que se utilizan en los edificios escolares están homologados y son de baja emisividad. Por tanto, lo previsible es que el nivel de contaminantes en el interior del aula sea bajo, independientemente del nivel del indicador (CO <sub>2</sub> ).
8.	Determinadas publicaciones identifican concentraciones de partículas por encima de ciertos niveles recomendables, asociados al uso de tizas en las pizarras y a la frecuencia de la aireación (Edurado, n.d.), no siendo un problema los niveles de partículas exteriores, por lo que el filtrado del aire de admisión no tendrá por qué ser un requisito siempre y en cualquier caso.

---

Las condiciones de la Tabla 4.17 y las consideraciones de la Tabla 4.18 constituyen el punto de partida para el diseño del SVN en el aula, que se desarrolla en el Capítulo 6.

## 4.- Parámetros normativos

### Resumen

En este apartado se tratan los parámetros normativos relativos a la Calidad del Ambiente Interior en los edificios de uso educativo, desde el enfoque del confort térmico y de la CAI. Se desarrolla en 4 apartados. En el primero se centra el marco normativo actual de referencia. A continuación se tratan los parámetros de confort térmico recomendables o exigibles y los contaminantes en base a cuyo nivel o concentración se suele determinar la calidad del aire, detallándose por un lado cuales son los más habituales y por otro cuáles son los niveles reglamentariamente admisibles. El análisis se realiza desde el enfoque de los requisitos normativos y finalmente se realiza una reseña sobre las recomendaciones que la OMS realiza al respecto.

- Parte de los datos contenidos en este capítulo se han publicado recientemente en la revista “Journal of Cleaner Prooduction” con el título “Identification of potential indoor air pollutants in schools” (Becerra et al., 2020). Journal of Cleaner Production. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118420>

### 4.- Parámetros normativos

4.1	Marco normativo actual de referencia .....	183
4.2	Parámetros de la Calidad del Ambiente Interior .....	183
4.2.1	Condiciones de Confort Térmico .....	183
4.2.2	Límites para la CAI .....	185
4.3	Contaminantes .....	187
4.3.1	Tipos de contaminantes .....	187
4.3.2	Límites recomendables para los contaminantes .....	188
4.3.3	El CO2 como indicador .....	191
4.4	Recomendaciones de la OMS .....	192

## 4.1 Marco normativo actual de referencia

Actualmente, la normativa que regula las condiciones de diseño de los edificios escolares en Andalucía es la normativa técnica general (Ministerio de vivienda, 2006), así como la norma sectorial específica (Consejería de Educación y Ciencia. Junta de Andalucía. Spain, 2003; Educación, 2010). En relación a las instalaciones, los parámetros de diseño también se desarrollan en diferentes reglamentos (REBT, RITE (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013)....etc...).

Por otro lado, es importante subrayar que a raíz de la publicación del CTE la normativa técnica adquiere un carácter prestacional y no prescriptivo, en base a lo cual se determinan las exigencias que se deben satisfacer, no obligando a una técnica ni sistema predeterminado.

Las DE establecen un claro marco en el que la cuestión de las condiciones climáticas concretas de la zona y la utilización de soluciones de diseño bioclimático deben estar presentes en las primeras fases del diseño de los edificios para conseguir edificios de consumo casi nulo (Comisión Europea, 2010, 2018; DOCE Diario Oficial de la Unión Europea, 2012; Europeo, Consejo, & Uni, 2003). Las condiciones climáticas específicas de Andalucía y las oportunidades de diseño bioclimático se han tratado en un apartado anterior de este capítulo.

En relación a la normativa específica de diseño de los edificios educativos, el “Real Decreto 132/2010, de 12 de febrero, por el que se establecen los requisitos mínimos de los centros que impartan las enseñanzas del segundo ciclo de la educación infantil, la educación primaria y la educación secundaria” (Educación, 2010), recoge como requisito mínimo el que tengan *“todos los espacios en los que se desarrolle la práctica docente ventilación e iluminación natural y directa desde el exterior”*. En cuanto a los edificios escolares como centros laborales, para el profesorado y el personal no docente, deben tenerse en cuenta las condiciones de seguridad y salud en los lugares de trabajo (Gobierno de España & Decreto, 1997).

En el caso concreto de los edificios escolares, la normativa sectorial (Consejería de Educación y Ciencia. Junta de Andalucía et al., 2003) realiza recomendaciones sobre las instalaciones que previsiblemente será necesario disponer en los centros educativos, en atención a las condiciones climáticas exteriores a lo largo del curso escolar y el régimen de uso y funcionamiento de los edificios. Es por esto que se especifican condiciones para el cálculo de una instalación de calefacción pero no de aire acondicionado. En cuanto a la ventilación y a la calidad del aire no menciona condiciones específicas, ya que con anterioridad al CTE el grado de hermeticidad de los edificios posibilitaba que la CAI se garantizase mediante infiltraciones y rutinas adecuadas de ventilación. Frente a esto, considerar las condiciones que establece el RITE en sus IT para el diseño de instalaciones mecánicas, no responde a la realidad del clima ni del tipo de edificio.

Por último, cabe señalar que las técnicas que se basan en el funcionamiento de la VN no están aún recogidas ni desarrolladas técnicamente en la normativa española ni en las herramientas de certificación, por lo que para poder hacer un planteamiento para un nuevo tipo de sistema, es necesario basarse en la normativa de otros países donde sí está testado y desarrollado.

## 4.2 Parámetros de la Calidad del Ambiente Interior

En cuanto a la CAI, los aspectos más significativos a controlar, como ya se ha dicho, son el confort térmico y la calidad del ambiente interior.

### 4.2.1 Condiciones de Confort Térmico

La norma general de diseño de la edificación (CTE (Ministerio de vivienda, 2006), LOE (Jefatura del Estado, 2012)) no establece un rango obligatorio de temperaturas a mantener en el interior de los edificios. Asimismo, tampoco se exige que se dispongan obligatoriamente sistemas mecánicos de acondicionamiento térmico. Sin embargo, es habitual que para evaluar la prestación de un edificio en cuanto al confort se adopten como recomendables los parámetros de confort térmico que la norma que desarrolla las instalaciones térmicas (RITE (Ministerio de la



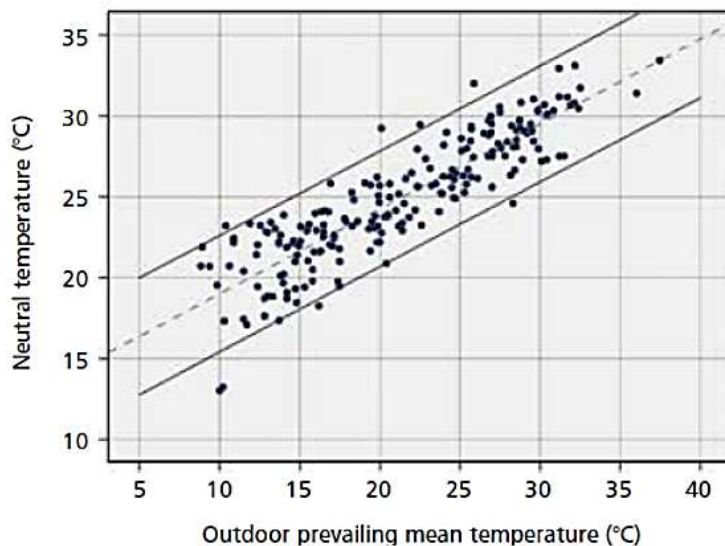
Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013)) establece como condiciones de diseño de los sistemas mecánicos (Fig.4.28).

Tabla 1.4.1.1 Condiciones interiores de diseño		
Estación	Temperatura operativa °C	Humedad relativa %
Verano	23...25	45...60
Invierno	21...23	40...50

**Fig.4.28.** Condiciones de diseño de la instalación térmica para satisfacer la exigencia de calidad térmica del ambiente según el RITE 2007 (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013)

Tanto el estándar AHRAE 55 (American Society of Heating refrigerating an air conditioning engineers, 2004) como la UNE EN 15251, consideran que los parámetros para evaluar edificios con sistemas mecánicos y edificios en oscilación libre (free-running) no pueden ser los mismos y basados en límites fijos, como son los que marcan las normas para diseños mecánicos (como en la ISO 7730). Ambos recomiendan para el caso de edificios en free-running aplicar condiciones de diseño considerando los valores de confort en relación a parámetros variables de confort adaptativo. Esto se comprueba en numerosos casos analizados, tal como se publica en CIBSE TM 52

(CIBSE, 2013), cuyos resultados se representan en la Fig.4.29.



**Fig.4.29.** Temperatura neutra en edificios en oscilación libre en relación a la temperatura exterior. Reproducido de CIBSE TM52 (CIBSE, 2013).

En la Fig.4.29 se representan los resultados obtenidos en casos reales ensayados, apreciándose en la gráfica cómo la temperatura neutra manifestada es creciente y está relacionada con la temperatura media exterior, obteniéndose resultados similares a los previstos en el ASHRAE 55 (Fig1.13).

No se han identificado en la actualidad normas técnicas en España que recojan cuestiones de diseño de los edificios relacionadas con estrategias de arquitectura bioclimática, como por ejemplo el confort adaptativo, lo cual supone una pérdida de oportunidad en cuanto a la mejora de la eficiencia energética y la reducción del consumo energético de los edificios. Sí se han encontrado estudios como el de Barbadilla et al. (Barbadilla-Martín et al., 2017) en el que se propone aplicar el confort adaptativo para variar la temperatura de consigna de acondicionamiento mecánico en oficinas con el enfoque del ahorro de energía de los sistemas. En el caso de los edificios escolares andaluces estaríamos ante un claro ejemplo de lo que se denomina "edificio mixto" (CIBSE, 2013), en el que parte del año funciona acondicionado térmicamente (invierno) y el resto gran parte del resto del año en oscilación libre.

En cuanto a la norma de seguridad y salud en el trabajo (Gobierno de España & Decreto, 1997), en ocasiones se pretende establecer el set-point de 27°C para exigir que esta coincida con la temperatura de confort de diseño de un edificio. En estos casos se está identificando la temperatura de diseño de la instalación con la temperatura seca del aire, así como las condiciones de diseño de un espacio cerrado con las condiciones de confort de un espacio abierto funcionando en oscilación libre o free-running.

## 4.2.2 Límites para la CAI

En la normativa española actual no figuran indicadores de obligado cumplimiento para establecer los niveles de CAI de los espacios. Por otra parte, al igual que en el caso del confort térmico, se tiende a comparar situaciones de edificios ventilados naturalmente con los parámetros que la norma establece para edificios con VM (RITE (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013) y UNE 13779 (AENOR, 2005)). Ambas normas se basan en el control del CO<sub>2</sub> para limitar la concentración de los contaminantes interiores, considerando que el espacio está cerrado y ventilado a través de UTAs. Suponen que controlando el nivel de CO<sub>2</sub> por debajo de un límite, lo cual relacionan con un determinado número de renovaciones de aire, los contaminantes no se producirán en elevadas cantidades, pero sin entrar a valorar el tipo concreto de contaminantes. Así lo recoge la UNE EN 13779 (AENOR, 2005), según la cual la CAI “*dependerá de la naturaleza de las fuentes contaminantes que sean tenidas en cuenta y los efectos de estos contaminantes*”. Es decir, establece consideraciones generalistas de manera que deberá identificarse qué contaminantes se producen en cada edificio. Entre las posibles fuentes emisoras que podemos encontrar enumera “las localizadas en el espacio o distribuidas a través del edificio, los emisores continuos o intermitentes y los emisores de partículas. En la Fig.4.30 se reproducen las tablas de la UNE y del RITE en las que se establece la clasificación básica de la CAI (Fig.4.30.a) y su relación con los niveles de concentración de CO<sub>2</sub> (Fig.4.30.b y 4.30.c).

a. Clasificación básica de la calidad del aire interior (IDA)

Categoría	Descripción
IDA 1	Calidad del aire interior alta
IDA 2	Calidad del aire interior media
IDA 3	Calidad del aire interior moderada
IDA 4	Calidad del aire interior baja

b. Niveles de CO<sub>2</sub> en los recintos

Categoría	Niveles de CO <sub>2</sub> sobre el nivel del aire exterior en ppm	
	Intervalo típico	Valores por defecto
IDA 1	< 400	350
IDA 2	400 – 600	500
IDA 3	600 – 1 000	800
IDA 4	> 1 000	1 200

c.

Tabla 1.4.2.3 Concentración de CO <sub>2</sub> en los locales	
Categoría	ppm (*)
IDA 1	350
IDA 2	500
IDA 3	800
IDA 4	1.200

Fig.4.30. Clasificación básica de la CAI: a) y b) según la UNE EN 13779 (AENOR, 2005) y c) según el RITE 2007 (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013)

Según se refleja en la Fig.4.30, la UNE 13779 recoge una clasificación básica para determinar la CAI para espacios acondicionados y ventilados mecánicamente de manera exclusiva, que se tiende a extrapolar para analizar la CAI de los espacios ventilados de manera natural, mediante la utilización de los parámetros que el RITE traslada de esta norma a sus IT (Fig. 4.30 c). Según se puede observar, mientras la UNE identifica unos niveles de CO<sub>2</sub> sobre el nivel del aire exterior con intervalos típicos (Fig.4.30.b.), el RITE reproduce exclusivamente los valores por defecto de la UNE (Fig.4.30.c.), lo cual conlleva mayores caudales de ventilación (Fig.4.31) y por tanto mayores consumos de energía.

Categoría	Unidad	Tasa de aire exterior por persona			
		Zona de no fumadores		Zona de fumadores	
		Intervalo típico	Valor por defecto	Intervalo típico	Valor por defecto
IDA 1	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> .persona <sup>-1</sup>	> 54	72	> 108	144
	l.s <sup>-1</sup> .persona <sup>-1</sup>	> 15	20	> 30	40
IDA 2	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> .persona <sup>-1</sup>	36 – 54	45	72 – 108	90
	l.s <sup>-1</sup> .persona <sup>-1</sup>	10 – 15	12,5	20 – 30	25
IDA 3	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> .persona <sup>-1</sup>	22 – 36	29	43 – 72	58
	l.s <sup>-1</sup> .persona <sup>-1</sup>	6 – 10	8	12 – 20	16
IDA 4	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> .persona <sup>-1</sup>	< 22	18	< 43	36
	l.s <sup>-1</sup> .persona <sup>-1</sup>	< 6	5	< 12	10

Fig.4.31. Tasas de aire exterior por persona. según la UNE EN 13779 (AENOR, 2005)

En la Fig.4.31 puede observarse cómo si se aplican los “valores por defecto”, la tasa de ventilación, para una misma CAI esperada (IDA 2), es el valor medio del intervalo típico, siendo un 25% superior al valor menor del intervalo (12,5 l/s frente a 10 l/s). En esta línea, cabe señalar nuevamente las indicaciones que ya se han expuesto de OMS, que recomienda en primer lugar limitar los contaminantes en su origen, para, posteriormente si es necesario, proceder a utilizar estrategias de ventilación. Igualmente la UNE 13779 realiza esta recomendación, indicando “se recomienda encarecidamente la selección de materiales no contaminados o con baja contaminación para el edificio, incluyendo muebles, alfombras y la ventilación o el sistema de acondicionamiento del aire en sí mismo, más que incrementar la tasa de ventilación de aire exterior para diluir estas emisiones evitables.” (AENOR, 2005).

Por tanto, para aplicar adecuadamente la norma a un uso específico, deben parametrizarse específicamente las condiciones del intervalo típico e identificarse los contaminantes que se producen en el interior del espacio. Los contaminantes más habituales en los edificios escolares se relacionan, junto con los límites recomendados en el punto 4.3 de este apartado.

El DBHS (Ministerio de Fomento, 2017) establece parámetros de diseño para el uso residencial pero, como se ha mencionado anteriormente, son determinaciones prestacionales y no prescriptivas, quedando en cualquier caso el uso docente fuera de su ámbito de aplicación. Esta norma además, establece el control del CO<sub>2</sub> exclusivamente, pero no publica un listado de contaminantes con los niveles máximos admisibles para cada caso. Al igual que las reglamentaciones de otros países, utiliza el CO<sub>2</sub> como un indicador de la CAI y mediante su control considera que obtienen el control de los contaminantes que se puedan producir en el interior (Fig.1.15).

La normativa más completa para su aplicación en edificios escolares que se ha identificado es el BB101 (Building Bulletin 101 (Department for Education UK, 2016; Department for Education and skills, 2006)), desarrollada para el Departamento de Educación del Reino Unido (“DEPARTMENT FOR EDUCATION UK,” n.d.). Es un manual que desarrolla específicamente las condiciones de ventilación en los edificios escolares. Esta norma define la VN como la más adecuada para su uso en edificios educativos frente a soluciones de VM. Así mismo, detalla los parámetros para el diseño y el cálculo de los SVN en los edificios escolares.

En cuanto a las emisiones, recoge una serie de materiales de construcción y su potencial de emisividad, entre los que se encuentran por ejemplo el vidrio, la piedra y la cerámica, indicándose que producen bajo nivel de emisiones debido a su composición.

En relación a los niveles de ventilación recomendados, establece condiciones diferentes según la ventilación que se esté usando en cada momento sea natural o mecánica (esta segunda para el caso de edificios con ventilación híbrida). Los valores para cada uno de los casos se recogen en la Tabla 4.19.

**Tabla 4.19. Límites de concentración de CO<sub>2</sub> según el BB101**

<b>Espacios docentes con VN</b>	Debe garantizarse suficiente aire del exterior para alcanzar un promedio diario de concentración de CO <sub>2</sub> durante el periodo ocupado menor a 1500 ppm y que la concentración máxima no exceda de 2000 ppm más de 20 minutos consecutivos cada día, cuando el número de ocupantes es igual o inferior a la ocupación de diseño	El sistema debe diseñarse para lograr un nivel de CO <sub>2</sub> 800 ppm por encima del nivel exterior
<b>Espacios docentes con VM</b>	Debe garantizarse suficiente aire del exterior para alcanzar un promedio diario de concentración de CO <sub>2</sub> durante el periodo ocupado inferior a 1000 ppm y que la concentración máxima no exceda de 1500 ppm durante más de 20 minutos cada día, cuando el número de ocupantes es igual o inferior a la ocupación de diseño	

Además de los niveles de concentración de CO<sub>2</sub> que se recomiendan por el BB101 para los edificios escolares en función del sistema de ventilación empleado (Tabla.4.19), se identifican las siguientes cuestiones a considerar en el diseño: i) La ventilación debe proporcionarse para limitar la concentración de CO<sub>2</sub> a la altura de la cabeza sentados en los espacios de enseñanza y ii) Cuando sea posible se utilizarán sensores de CO<sub>2</sub> para monitorizar y controlar los sistemas de ventilación con la finalidad del ahorro de energía.

### 4.3 Contaminantes

En los siguientes apartados se determinan los niveles recomendables para cada uno contaminantes más habituales en el interior de los espacios, según la normativa.

#### 4.3.1 Tipos de contaminantes

La OMS identifica los contaminantes más comunes que se producen según las fuentes existentes en el interior de los espacios en general (Guía para la Calidad del Aire Interior (WHO, 2010)), (Fig.4.32), analizando en detalle los siguientes: benceno, CO, formaldehídos, naftaleno, NO<sub>2</sub>, hidrocarburos aromáticos policíclicos, radón, tricloroetileno y tetrachloroetileno.

Group 1. Development of guidelines recommended	Group 2. Current evidence uncertain or not sufficient for guidelines
Benzene	Acetaldehyde
Carbon monoxide	Asbestos
Formaldehyde	Biocides, pesticides
Naphthalene	Flame retardants
Nitrogen dioxide	Glycol ethers
Particulate matter (PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> )	Hexane
Polycyclic aromatic hydrocarbons, especially benzo-[a]-pyrene	Nitric oxide
Radon	Ozone
Trichloroethylene	Phthalates
Tetrachloroethylene	Styrene
	Toluene
	Xylenes

**Fig.4.32.** Contaminantes producidos por fuentes del interior de los espacios según la OMS. Reproducido de (WHO, 2010)

Para el caso específico de los edificios escolares, la OMS (WHO Regional Office for Europe, 2015) estudia en diferentes países el control que se realiza de la exposición a contaminantes químicos, humedades y factores físicos. Los límites que establece para los contaminantes químicos se recogen en la Fig.4.33.a.

Por su parte, el BB101 (Department for Education UK, 2016) recoge, en relación a los contaminantes, los resultados obtenidos por el proyecto SINPHONIE (Eduardo, n.d.) en el que se clasifican los contaminantes en: i) físicos y químicos y ii) microbiológicos (Fig.4.33 b). Dentro del conjunto de contaminantes físicos y químicos, se incluyen los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y la Materia Particulada (MP) PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> así como gases como el ozono (O<sub>3</sub>), el monóxido de carbono (CO) y el radón.

**Table 5. Summary of WHO IAQ guideline limits for selected pollutants**

**a.**

Pollutant	Guideline limit	Excess cancer risk	Averaging time	Comment
Benzene	No safe level	6x10 <sup>-6</sup> per µg m <sup>-3</sup>	Lifetime	Carcinogen
Carbon monoxide	7 mg m <sup>-3</sup>		24 h	
	10 mg m <sup>-3</sup>		8 h	
	35 mg m <sup>-3</sup>		60 min	
	100 mg m <sup>-3</sup>		15 min	
Formaldehyde	100 µg m <sup>-3</sup>		30 min	
Naphthalene	10 µg m <sup>-3</sup>		1 year	
Nitrogen dioxide	40 µg m <sup>-3</sup>		1 year	
	200 µg m <sup>-3</sup>		1 hour	
PAH with Benzo[a]pyrene as marker	No safe level	8.7x10 <sup>-5</sup> per ng m <sup>-3</sup>	Lifetime	Carcinogen
Tetrachloroethylene	250 µg m <sup>-3</sup>		1 year	
Trichloroethylene	No safe level	4.3x10 <sup>-7</sup> per µg m <sup>-3</sup>	Lifetime	Carcinogen

Source: WHO Regional Office for Europe (2010b)

**b.**

Physical and chemical pollutants	Micro-biological pollutants
Benzene	Endotoxin
Trichloroethylene	Specific fungal and bacterial groups
Tetrachloroethylene	• <i>Penicillium/Aspergillus</i> group
Formaldehyde	• <i>Cladosporium herbarum</i>
Naphthalene	• <i>Aspergillus versicolor</i> ,
Benzo(a)pyrene	• <i>Alternaria alternate</i>
a-pinene	• <i>Trichoderma viride</i>
d-limonene	• <i>Streptomyces</i> spp.
PM <sub>2.5</sub>	• <i>Mycobacterium</i> spp.
PM <sub>10</sub>	Allergens
NO <sub>2</sub>	House-dust mites
Ozone	Horse, cat and dog allergens
CO	
Radon	

**Fig.4.33.** Contaminantes: a) Reproducido de "School environment: policies and current status" (WHO) (WHO Regional Office for Europe, 2015); b) . Indicadores para la monitorización de la CAI en escuelas europeas s/ BB101 (2016). Reproducido de (Department for Education UK, 2016)

Para la caracterización de la CAI en los edificios escolares en el marco de esta tesis, los agruparemos en 3 apartados: COV; MP, gases. El CO<sub>2</sub> no se caracteriza como un contaminante sino como un indicador.

**COV.** Incluyen un conjunto de hidrocarburos que, en circunstancias normales se encuentran en forma gaseosa a temperatura ambiente, o bien, tienen una alta volatilidad en esas condiciones. Consisten en una amplia gama de contaminantes que pueden estar en el aire, desde compuestos muy volátiles, como el formaldehído, hasta compuestos semivolátiles, como los plastificantes de ftalato. Los COV que pueden ser más preocupantes para la salud son el benceno, el tricloroetileno, el tolueno y el tetracloroetileno. Otros compuestos con presencia potencial en ambientes interiores son el etilbenceno, o+m+p-xileno, estireno, 1, alfa-pineno y 4-diclorobenceno. Todos ellos presentan un riesgo para la salud de los ocupantes si las concentraciones exceden los límites recomendados. Dentro de este grupo, los aldehídos son contaminantes químicos del ambiente interior y exterior de particular interés, debido a sus efectos adversos para la salud en los seres humanos y su importante papel en la química atmosférica. En ambientes interiores, los aldehídos predominantes son principalmente formaldehído y acetaldehído. Otros contaminantes del aire son acroleína, propanal, butanal, pentanal, isopentanal, hexanal y benzaldehído. Se sabe que algunos son tóxicos y afectan especialmente a los niños (Commission, 1997; Madureira et al., 2015), por lo que su control es de especial interés en pinturas y barnices.

**MP.** Tiene su origen en fuentes primarias (suelo, rocas) o secundarias derivadas de las actividades humanas. Los niveles de partículas que se suelen controlar son los de PM10 (de tamaño inferior a 10 micras) y PM2,5 de tamaño inferior a 2,5 micras. En relación a la MP, la OMS considera que no hay evidencias convincentes de la diferencia de la naturaleza nociva de la MP de las fuentes interiores en comparación con las procedentes del exterior (WHO, 2010). También se recoge que los niveles interiores de partículas PM10 y PM 2,5 en presencia de fuentes interiores de partículas, son habitualmente superiores que los niveles de MP exteriores.

**Gases: O<sub>3</sub>, CO y radón.** El O<sub>3</sub> es un contaminante secundario de origen fotoquímico, no emitido directamente a la atmósfera, sino formado mediante reacciones fotoquímicas, en presencia de luz solar, a partir de otros contaminantes primarios. Los mayores niveles se dan en verano. El CO es el resultado de la combustión incompleta de materia orgánica. Fuentes interiores de producción de este gas pueden ser calentadores o equipos que funcionan con combustibles a base de carbono. En cuanto al radón se produce, de forma natural, en el subsuelo y emana a la superficie, en mayor o menor medida, dependiendo del tipo de terreno. Es más pesado que el aire por lo que suele concentrarse en sótanos y otras zonas en contacto con el terreno. A su vez puede introducirse en el interior de los edificios si estos espacios en contacto con el terreno no tienen una adecuada ventilación.

**CO<sub>2</sub>.** Ninguna de las publicaciones anteriores caracteriza el CO<sub>2</sub> como contaminante sino como un indicador de la CAI, ya que no es tóxico ni nocivo para la salud, presentando efectos adversos sólo cuando se alcanzan valores muy elevados que no se suelen dar en los espacios habitualmente ocupados por las personas (Guais et al., 2011; Ministerio de la Presidencia, 2007). Del mismo modo, tampoco se han identificado referencias a los niveles de MP en interiores.

#### 4.3.2 Límites recomendables para los contaminantes

Los límites dentro de los cuales deben mantenerse los contaminantes controlados, se recogen en las tablas reproducidas en las Fig.4.34 y Fig.4.35, tal como han sido publicadas recientemente por Becerra et. al (Becerra et al., 2020), en relación a los ensayos desarrollados para caracterizar el tipo de contaminantes en las aulas, en el marco de actuación del proyecto ClimAct.

Los ensayos se han centrado en el análisis de los dos primeros grupos (COV y MP), así como de los niveles de CO<sub>2</sub> como indicador de control. Los COV a su vez se analizan en dos sub-grupos: los COVt (que incluyen los COV totales) (Fig.4.34) y los aldehídos (Fig.4.35).

**COV** Los límites se recogen en la Fig.4.35, con referencias de las siguientes normas: COVt: legislación portuguesa (Decreto-Lei n.º 78, 2006; Decreto-Lei n.º 79, 2006; Portaria n.º 353-A, 2013) y la inglesa (Department for Education UK, 2016; Department for Education and skills, 2006); Benceno: legislación portuguesa (Portatia n.º 353-A, 2013), francesa (ANSES, n.d., 2011), OMS (WHO, 2010) y otras publicaciones (Mandin et al., 2009); Tricloroetileno: legislación francesa (ANSES, n.d., 2011) y OMS (WHO, 2010); Tolueno: legislación portuguesa (Portatia n.º 353-A, 2013) y alemana (Umweltbundesamt, 2018); Tetracloroetileno: portuguesa (Portatia n.º 353-A, 2013); francesa (ANSES, n.d., 2011), OMS (WHO, 2010) e inglesa (Department for Education, 2016); Etilbenceno: valores EU-LCI comisión europea (European Commission, 2016); O+m+p-xileno: valores EU-LCI comisión europea (European Commission, 2016) y norma alemana (Umweltbundesamt, 2018); Estireno: portuguesa (Portatia



nº 353-A, 2013), valores EU-LCI comisión europea (European Commission, 2016), y norma alemana (Umweltbundesamt, 2018); Alpha-pinene: valores EU-LCI comisión europea (European Commission, 2016) y norma alemana (Umweltbundesamt, 2018); 1,4-diclorobenceno: valores EU-LCI comisión europea (European Commission, 2016)

Air pollutants: volatile organic compounds	Unit	Guideline	Exposure time and observation
<b>TVOC</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<600 (0.26 ppm for isobutylene)	Mean concentration during occupied period. Tolerance up to $\pm 10\%$ according to occupancy rate
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<600	Mean concentration during occupied period.
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<300	Mean concentration of 8 h
<b>Benzene</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<5	Maximum reference concentration
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<2 <sup>a</sup>	Lifelong exposure
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<1.7 <sup>a</sup>	Lifelong exposure
<b>Trichloroethylene</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<25	Maximum reference concentration
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<20	Lifelong exposure
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<23 <sup>a</sup>	
<b>Toluene</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<250	Maximum reference concentration
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<300 <sup>b</sup>	
<b>Tetrachloroethylene</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<250	Maximum reference concentration
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<250	Exposure of >1 year
<b>Ethylbenzene</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<850	
<b>o+m+p-xylene</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<500	
<b>Styrene</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<100 <sup>b</sup>	
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<260	Maximum reference concentration
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<250	
<b>Alpha-pinene</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<30 <sup>b</sup>	
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<2500	
<b>1,4-dichlorobenzene</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<200 <sup>b</sup>	
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<150	

<sup>a</sup> For concentrations of airborne pollutant associated with an excess lifetime cancer risk of  $10^{-5}$

<sup>b</sup> Effect-related value based on current toxicological and epidemiological knowledge of the substance.

**Fig.4.34.** Compuestos orgánicos volátiles (COV): unidades y cuantificación de valores según diferentes guías de calidad de aire interior. Reproducido de (Becerra et al., 2020)

**Aldehídos** Los límites se recogen en la Fig.4.35, con referencias de las siguientes normas:

Formaldehído: norma francesa (ANSES, n.d., 2011; Mandin et al., 2009), OMS (WHO, 2010), norma inglesa (Department for Education, 2016), Portugal (Decreto-Lei n.º 78, 2006; Decreto-Lei n.º 79, 2006), Valores EU-LCI (European Commission, 2016); Acetaldehído: norma francesa (ANSES, n.d., 2014), valores EU-LCI (European Commission, 2016), norma alemana (Umweltbundesamt, 2018); Acroleína: norma francesa (ANSES, n.d., 2011), otras publicaciones (Ramalho et al., 2015); Propanal: no hay guía; Butanal: valores EU-LCI (European Commission, 2016); Benzaldehído: Norma alemana (Umweltbundesamt, 2018); Isopentanal: No hay guía; Pentanal: valores EU-LCI (European Commission, 2016); Hexanal: valores EU-LCI (European Commission, 2016)

Air pollutants: aldehydes	Unit	Guideline	Exposure time and observation
<b>Formaldehyde</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<50	Exposure of 2 h
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<10	Exposure of >1 year
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<100	30-min average concentration
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<100	Maximum reference concentration. Tolerance up to $\pm 20\%$ according to occupancy rate.
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<100	
<b>Acetaldehyde</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<3000	Exposure of 1 h
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<160	Exposure of >1 year
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<1200	
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<100 <sup>a</sup>	
<b>Acrolein</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<0.8	
<b>Propanal</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	no guideline	
<b>Butanal</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<650	
<b>Benzaldehyde</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<20 <sup>a</sup>	
<b>Isopentanal</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	no guideline	
<b>Pentanal</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<800	
<b>Hexanal</b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<900	

<sup>a</sup> Effect-related value based on current toxicological and epidemiological knowledge of the substance.

**Fig.4.35.** Aldehídos, unidades y cuantificación de valores según diferentes guías de calidad de aire interior. Reproducido de (Becerra et al., 2020)

**MP.** Aunque la OMS (WHO, 2010) en principio no lo identifica como un contaminante (Fig.4.33), en otras publicaciones sí se incluye como un factor a controlar (Department for Education UK, 2016; Ramalho et al., 2015; WHO Regional Office for Europe, 2015), por lo que se han incluido en el análisis de la CAI. Los valores de referencia se recogen en la tabla reproducida en la Fig.4., para considerarlos en el análisis de la CAI que se realice en edificios escolares. Se reflejan los límites establecidos en el estándar ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2009), en la norma portuguesa (Portaria nº 353-A, 2013) y en las guías de la OMS según Ramalho et al. (Ramalho et al., 2015).

Air pollutants: particulate matter fractions	Unit	Guideline	Exposure time and observation
<b>PM<sub>2.5</sub></b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<15	1-year mean
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<35	24-h mean
		<25	Mean concentration during occupied period.
<b>PM<sub>10</sub></b>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<10	Annual mean during the occupancy hours only.
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<25	24-h mean
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<150	24-h mean
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<150	Mean concentration during occupied period. Tolerance up to $\pm 10\%$ according to occupancy rate.
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<50	Mean concentration during occupied period.
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<20	Annual mean during the occupancy hours only
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	<50	24-h mean

**Fig.4.36.** Niveles de MP: unidades y cuantificación de valores de guías de calidad de aire interior. Reproducido de (Becerra et al., 2020)

**Gases** (CO, ozono y radón), se han considerado en la clasificación contaminantes exteriores, por lo que no se evalúan en la CAI. Para los dos primeros se ha comprobado que no existen fuentes de producción interiores



(combustión o productos electrónicos). A su vez, se controlan a través de las estaciones de medida urbana. En cuanto a los niveles de radón cabe señalar que la norma española en relación a este tema se encuentra recientemente aprobada por el CTE (DBHS6). Para este gas, la práctica constructiva de los edificios educativos, según la cual tradicionalmente la planta baja se construye con un forjado sanitario ventilado, hace que este tipo de edificios también estén protegidos frente a la concentración de radón en interiores.

En el caso de Andalucía, las estaciones de medición de la Calidad del Aire se pueden consultar en la web de la Junta de Andalucía “Red de vigilancia y control de la calidad del aire en Andalucía” (C. A. ganadería pesca y desarrollo sostenible Junta de Andalucía, n.d.). En los informes que se emiten diariamente (Junta de Andalucía & Consejería de Agricultura Ganadería Pesca y Desarrollo Sostenible, n.d.) se analizan los siguientes contaminantes: SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, CO y O<sub>3</sub>. En base a ellos se clasifica la Calidad del Aire en buena, admisible, mala o muy mala.

En relación a los contaminantes exteriores más habituales, en la Fig.4.37 se representan los recogidos por la UNE EN 13779 así como la clasificación que realiza del aire exterior de diseño.

**Ejemplos de las concentraciones de contaminantes en el aire exterior**

Descripción de la localización	Concentración					
	CO <sub>2</sub> ppm	CO mg m <sup>-3</sup>	NO <sub>2</sub> μg m <sup>-3</sup>	SO <sub>2</sub> μg m <sup>-3</sup>	Total PM mg m <sup>-3</sup>	PM <sub>10</sub> μg m <sup>-3</sup>
a. Área rural; sin fuentes significativas	350	< 1	5 a 35	< 5	< 0,1	< 20
Pueblo pequeño	375	1 a 3	15 a 40	5 a 15	0,1 – 0,3	10 a 30
Centro de ciudad contaminando	400	2 a 6	30 a 80	10 a 50	0,2 – 1,0	20 a 50

**Clasificación del aire exterior (ODA)**

Categoría	Descripción
b. ODA 1	Aire puro que solo puede ensuciarse temporalmente (por ejemplo polen)
ODA 2	Aire exterior con altas concentraciones de partículas
ODA 3	Aire exterior con altas concentraciones de gases contaminantes
ODA 4	Aire exterior con altas concentraciones de gases contaminantes y de partículas
ODA 5	Aire exterior con muy altas concentraciones de gases contaminantes o de partículas

**Fig.4.37.** Caracterización del aire exterior según la UNE EN 13779 (AENOR, 2005). a) Ejemplos de concentraciones de contaminantes en el exterior. b) Clasificación del aire exterior (ODA)

### 4.3.3 El CO<sub>2</sub> como indicador

El CO<sub>2</sub> no se considera como un contaminante sino como un indicador del nivel de la CAI que se relaciona con el nivel de las emisiones de bioefluentes humanos en un espacio. Su concentración depende del número de ocupantes del local, su nivel de actividad, el tiempo de ocupación y la tasa de ventilación. Si el nivel identificado en el aire está por encima de determinados rangos, se asocia a ambiente cargado, por lo que se supone que estarán presentes otros elementos que sí se consideran como contaminantes.

Según el BB101 (Department for Education, 2016), para obtener una buena CAI (condiciones de bienestar), la concentración de CO<sub>2</sub> debe oscilar entre 380 ppm, que es el valor promedio del aire exterior y 1.500 ppm como valor de concentración media durante el período ocupado. El nivel exterior varía de unas localizaciones a otras, pero está reconocido un nivel general medio de 400 ppm en ausencia de mediciones específicas, según se recoge en diferentes publicaciones, como por ejemplo el DBHS (Ministerio de Fomento, 2017) y UNE EN 13779 (Fig.4.37).

En cuanto a los valores de toxicidad, estos se muestran por encima de las 10.000 ppm, los problemas respiratorios aparecen por encima de 35.000 ppm, los síntomas de parálisis se muestran por encima de 85.000 ppm y la muerte se produce en poco tiempo por encima de 200.000 ppm (Guais et al., 2011; Ministerio de la Presidencia, 2007). Sin embargo, estas reacciones no son por lo general un efecto directo de CO<sub>2</sub>, sino que se deben a la presencia de otros contaminantes interiores peligrosos (Ramalho et al., 2015).

De este modo, según la UNE 13779 (AENOR, 2005), “la investigación actual y la práctica sugieren que la CAI puede clasificarse por la concentración de CO<sub>2</sub>, buen indicador de la emisión de bioefluentes humanos, siendo la clasificación por el nivel de CO<sub>2</sub> bien establecida para los recintos ocupados, donde no está permitido fumar y la contaminación está causada principalmente por el metabolismo humano”. Como medirlo es fácil, se usa como indicador, con los límites recomendados siguientes según la distinta normativa recogida en la tabla que se reproduce en la Figura 4.38, según la cual las principales referencias se encuentran en la UNE-EN 13779 (AENOR, 2005) y las normas de Francia (Circulaire du 9 août modifiée relative à la révision du règlement sanitaire départemental type (RSDT). Numéro complémentaire du 13 septembre 1978, 1978), Portugal (Decreto-Lei n.º 78, 2006; Portaria n.º 353-A, 2013) y Reino Unido (Department for Education UK, 2016; Department for Education and Skills, 2006).

Air pollutants, units and quantification of indoor air guideline values. CO <sub>2</sub>			
Air pollutants: gases	Unit	Guideline	Exposure time and observation
CO <sub>2</sub>	ppm	≤800-1000	CO <sub>2</sub> concentration
	ppm	<1000	Mean concentration during occupied period. Tolerance up to 1300 ppm.
	ppm	<984 ppm	Maximum reference concentration. Tolerance up to ±10% according to occupancy rate.
		(1800 mg/m <sup>3</sup> )	
	ppm	<1250 (2250 mg/m <sup>3</sup> )	Mean concentration during occupied period.
	ppm	<1500	Mean concentration during occupied period.
	ppm	<1000	Mean concentration during occupied period with mechanical ventilation. Tolerance up to 1500 over 20 min.
	ppm	<1500	Mean concentration during occupied period with natural ventilation. Tolerance up to 2000 over 20 min.

Fig.4.38. CO<sub>2</sub>; unidades y cuantificación según diferentes guías. Reproducido de (Becerra et al., 2020)

Cabe señalar que no existe ninguna regulación específica en España que indique el nivel máximo de CO<sub>2</sub> que debe alcanzarse en los edificios escolares con funcionamiento libre u operación de VN. Como ya se ha mencionado con anterioridad, sólo existe referencia a las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el DBHS del CTE, en relación a viviendas, según la Fig.1.15.

La tasa de renovación de aire basada en la producción de CO<sub>2</sub> esperable en función de la ocupación se ha revisado en algunas publicaciones, como la de Persily y de Jonge (Persily & de Jonge, 2017), donde proponen un nuevo sistema de estimación de la tasa de producción de CO<sub>2</sub>, según el cual, en uso educativo debería ser del orden de 7,4 l/seg y ocupante, lo cual contrasta enormemente con la tasa de 12,5 litros recomendada por el RITE (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013) para sistemas mecánicos.

Según lo anterior, se evidencia que los estándares establecidos por el RITE para SVM no deben ser aplicados directamente al uso escolar, independientemente del sistema de ventilación que se emplee, siendo necesario parametrizar específicamente los niveles de ventilación en función de los contaminantes presentes. Para ello, se han desarrollado ensayos específicos, que se detallan en los siguientes capítulos del plan experimental.

#### 4.4 Recomendaciones de la OMS

Por último, es interesante resumir algunas reflexiones y recomendaciones extraídas de diversas publicaciones de la OMS (European Commission. Directorate for Health and Consumers, 2014; “Medioambiente-Junta Andalucía,” n.d.; Technical University of Denmark, n.d.; WHO Regional Office for Europe, 2015):

##### Resultados obtenidos en estudios en escuelas de diversos países europeos:

1. Se obtiene un valor medio de concentración interior de CO<sub>2</sub> de 1433 ppm, aunque se alcanzan valores superiores en ciertas localizaciones, siendo el valor máximo medido de 4960 ppm (WHO Regional Office for Europe, 2015).
2. La mayor parte de los edificios escolares en Europa (86%) disponen de VN, el 7% ventilación asistida y el otro 7% VM.

3. Identifica las aulas como espacios de elevada densidad de ocupación, siendo recomendable una superficie superior a 1,5 m<sup>2</sup> por escolar. Así mismo, se considera que niveles de CO<sub>2</sub> por encima de los 1500 ppm pueden afectar al aprendizaje.
4. La circunstancia de la dificultad del mantenimiento de los edificios de uso docente y sus instalaciones es una tónica común también a nivel internacional.

#### Recomendaciones:

1. Mantener unos niveles de ventilación adecuados para conseguir que el nivel de contaminantes se encuentre bajo límites admisibles. A su vez, una estrategia de ventilación saludable debe basarse en los siguientes dos principios (Associations, Breilh, & Goeders, 2012; Technical University of Denmark, n.d.):
  - i) El aire interior debe cumplir con las recomendaciones de la OMS en sus guías de calidad del aire.
  - ii) La estrategia prioritaria debe ser controlar las fuentes contaminantes, mientras que la ventilación debe usarse de manera suplementaria para el control de la exposición.
2. Según el BB101 (Department for Education UK, 2016; Department for Education and skills, 2006), si se siguen las pautas de diseño de la OMS, el aire exterior de diseño puede considerarse ODA1 (aire puro que solo puede ensuciarse temporalmente) (Fig.4.37.b.).
3. Las recomendaciones del proyecto SINPHONIE (European Commission. Directorate for Health and Consumers, 2014), tienen un carácter preventivo, proponiendo la realización de programas de salud ambiental sostenible en escuelas. Para ello el requisito previo será el diseño de un edificio sostenible. Esto se consigue combinando los avances en ingeniería y arquitectura con el conocimiento de estrategias de la arquitectura tradicional de cada lugar. Así mismo, recomienda el desacople de los sistemas de ventilación y de acondicionamiento térmico, no siendo aconsejable unificar ambas funciones en una instalación única. También recomienda ubicar los edificios escolares en áreas no contaminadas y utilizar materiales de baja emisividad.
4. Las recomendaciones de SINPHONIE (European Commission. Directorate for Health and Consumers, 2014) incluyen tres enfoques específicos:
  - i) Especificaciones relativas a la localización
    - a. Controlar la contaminación urbana
    - b. Seleccionar localizaciones sin contaminación para los colegios
    - c. Utilizar estrategias de control del radón
  - ii) Relativas al diseño construcción y mantenimiento del edificio
    - a. Enfoque global en el diseño, construcción y mantenimiento del edificio (adecuada selección de materiales limpios y no emisivos en edificios nuevos y reformas)
    - b. Eliminar fuentes de humedad y de alérgenos de los edificios
    - c. Desarrollar estrategias de calefacción y cuando sea necesario también de refrigeración
    - d. Desacople de los sistemas de acondicionamiento térmico de los de ventilación
    - e. Desarrollar una estrategia de ventilación en las aulas y establecer niveles mínimos de ventilación, expresados en l/seg y persona , basados en criterios de salubridad
  - iii) Relativas al uso y funcionamiento
    - a. Establecer densidades máximas de ocupación en las aulas
    - b. Monitorizar periódicamente la CAI en las escuelas y los parámetros de salud en los alumnos
    - c. Manual para una gestión adecuada del ambiente interior en las escuelas y en particular de la CAI
    - d. Usar productos de limpieza de baja emisividad
    - e. Usar materiales de construcción y didácticos de baja emisividad
    - f. Informar a los profesores alumnos y familias de la importancia de mantener una adecuada CAI
    - g. Asignar responsables de la CAI en las escuelas
    - h. Desarrollar e implementar metodologías y protocolos para garantizar la CAI

## **CAPÍTULO 5\_MODELO DE CÁLCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA (Plan experimental 1ª parte: datos para el diseño)**

**MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS EDIFICIOS DE USO EDUCATIVO EN CLIMA MEDITERRÁNEO:  
Aplicación práctica de diseño y cálculo de Sistemas de Ventilación Natural**



## **CAPÍTULO 5.- MODELO DE CÁLCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA (Plan experimental 1ª parte: datos para el diseño)**

- 1. Condiciones de funcionamiento**
- 2. Diseño y dimensionado del SVN**

La finalidad de este Capítulo 5, que constituye la primera fase del plan experimental, es obtener datos de los parámetros de funcionamiento de la tipología de edificio para ser utilizados en la configuración del modelo de cálculo. Con este modelo se realizará el diseño de la solución que dará respuesta a los requerimientos normativos. Los datos obtenidos siguiendo esta primera parte del plan experimental se detallan en el apartado 1 “Condiciones de funcionamiento” y sirven para proponer el diseño y posterior cálculo de un SVN en el apartado 2.





# 1.- Condiciones de funcionamiento

## Resumen

El objetivo de esta fase de la tesis es conocer en detalle las condiciones específicas de operación y funcionamiento de los edificios de uso educativo sobre los que proponer mejoras en el marco de este estudio. Para ello se ha partido del conocimiento de tres aspectos básicos: i) cantidad de energía necesaria para el funcionamiento y estructura de la demanda; ii) condiciones de Calidad del Aire Interior y Exterior; iii) eficacia de los sistemas de ventilación para garantizar la CAI. Para estudiar cada aspecto anterior se llevan a cabo distintos tipos de pruebas experimentales: simulaciones informáticas, monitorización para la obtención de medidas “in situ” y ensayos específicos con equipos de medida, que constituyen la 1ª fase del plan experimental. Ésta se desarrolla del siguiente modo para cada uno de los aspectos:

1. **Caracterización energética y estructura de la demanda:** se desarrolla el análisis de un edificio tipo, sobre el que se realizan simulaciones de cálculo que se contrastan con datos reales y medidas “in situ”. Se obtienen resultados indicadores del impacto del edificio en su funcionamiento en cuanto al potencial consumo de energía y su huella de carbono, que permiten su caracterización y comparación con el mismo tipo de edificio en otras localizaciones.
2. **Condiciones de Calidad del Aire Interior y Exterior:** se estudian mediante ensayos y pruebas de la campaña de medidas “in situ”. Se obtienen resultados que son indicadores de la calidad del ambiente interior (calidad del aire y condiciones de confort térmico), obteniendo datos de temperatura, humedad, concentración de CO<sub>2</sub>, concentración de partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> y compuestos orgánicos volátiles (COV).
3. **Eficacia de los sistemas de ventilación para garantizar la CAI:** se analiza mediante ensayos experimentales y toma de medidas “in situ” en edificios con SVN y SVM. Para ello se realizan ensayos específicos en los que analiza comparativamente el funcionamiento de un SVM y un SVN implementados en sendos edificios de uso educativo, durante su fase operativa. Se realizan ensayos específicos en los que se mide la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> como principal indicador de la CAI en los edificios demostradores con los dos sistemas de ventilación (natural y mecánica).

Parte de los resultados y datos recogidos en este capítulo se han presentado en los siguientes congresos:

- “12th SDEWES conference en 2017 y 13th SDEWES conference”, en 2018, con el título “Passive actions in building envelope to enhance sustainability in Mediterranean climate. Application to school buildings”. 12th Conference on sustainable development of energy, water and environment systems. Sdewes Centre. <http://www.dubrovnik2017.sdewes.org>
- “11th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems – SDEWES Conference,” en 2016, con el título “Natural Ventilation Systems in 21st century Zero Energy Buildings”. Sdewes Centre. <http://www.lisbon2016.sdewes.org/>

Así mismo, se han publicado 3 artículos asociados a la información recogida en este capítulo:

- “Passive actions in the building envelope to enhance the sustainability of schools in Mediterranean climate” (Gil-Baez, Padura, & Huelva, 2019). Energy. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.094>
- “Natural ventilation systems in 21st-century for near zero energy school buildings” (Gil-Baez, Barrios-Padura, Molina-Huelva, & Chacartegui, 2017). Energy. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.188>
- “Identification of potential indoor air pollutants in schools” (Lizana et al., 2020). Journal of Cleaner Production. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118420>

## 1.- Condiciones de funcionamiento

1.1	Demanda y consumo de energía.....	200
1.1.1	Métodos y sistemas .....	200
1.1.2	Edificio modelo.....	201
1.1.3	Resultados y validación .....	201
1.1.4	Análisis y discusión.....	202
1.1.5	Conclusiones.....	205
1.2	Calidad del aire.....	206
1.2.1	Metodología .....	206
1.2.2	Resultados.....	213
1.2.3	Análisis y discusión.....	216
1.2.4	Conclusiones del apartado.....	222
1.3	Eficacia de los sistemas de ventilación para garantizar la CAI .....	224
1.3.1.	Metodología .....	224
1.3.2.	Resultados.....	228
1.3.3.	Análisis y discusión.....	229
1.3.4.	Conclusiones del apartado .....	231

## 1.1 Demanda y consumo de energía

La demanda y el consumo de los edificios pueden variar tanto por factores constructivos como de uso y gestión del edificio. En cualquier caso, conocer estos factores es prioritario a la hora de establecer mejoras en el desempeño de los edificios.

El consumo de energía de los edificios escolares varía según la localización. Días Pereira et al. (Días Pereira, Raimondo, Corgnati, & Gameiro Da Silva, 2014) afirman que el consumo de Energía Primaria puede oscilar entre los 10 kWh/m<sup>2</sup> año en Italia y los 278 kWh/m<sup>2</sup> año en Japón. Por tanto, es importante conocer el factor característico de consumo en el ámbito de este estudio. Uno de los objetivos del proyecto ClimAct ("ClimAct. Transition to a low carbon economy in schools," 2017), en el que la doctoranda ha participado como investigadora, y desarrollado en la zona mediterránea, ha sido conocer la estructura de consumo de energía de los edificios docentes en este ámbito y así proponer soluciones de mejora. Para ello se han analizado 35 casos de estudio en España, Portugal y Francia, observándose (Lizana, Serrano-Jimenez, Ortiz, Becerra, & Chacartegui, 2018) cómo los centros en España, con un clima más suave, tienen un consumo sensiblemente inferior al resto, con valores de 30 kWh/m<sup>2</sup> año, en comparación con los 50 kWh/m<sup>2</sup> año de Portugal y los 128 kWh/m<sup>2</sup> año de Francia. Dentro de los centros del conjunto estudiado en España, el subgrupo localizado en la zona sur representa diferentes tipologías constructivas, épocas y niveles educativos. Para este subgrupo el valor promedio de consumo de Energía Final, según los datos de las facturas, es de 26,76 kWh/m<sup>2</sup> año.

En cuanto a su estructura, el consumo se compone habitualmente de varios factores. Estos se indican en la Tabla 5.1, junto con el tipo de combustible o fuente de energía utilizada para cada uno de ellos.

**Tabla 5.1.** Tipos de consumo en centros escolares. (fuente: elaboración propia)

TIPO DE CONSUMO	ENERGÍA UTILIZADA
Iluminación	Electricidad
Sistemas HVAC	Calefacción y refrigeración: gas natural, gas oil, electricidad
	Ventilación: electricidad
Producción de ACS	Placas solares
	Apoyo: mismo combustibles que la calefacción
Usos varios (fuerza para equipos, pizarras digitales, etc...)	Electricidad

Los sectores de consumo que se han tenido en cuenta en la herramienta desarrollada en el marco del proyecto ClimAct para la evaluación del comportamiento energético de los edificios escolares llamada SchoolEnergy-ACT (Lizana et al., 2018), han sido los de iluminación, sistemas HVAC y producción de ACS. Esta herramienta además basa sus resultados en los datos reales de consumo de los edificios, en base a los cuales, realiza una valoración de la que se desprenden las oportunidades de mejora aplicables a los centros. Entre estas soluciones se han identificado los SVN.

En cuanto a la demanda de energía del edificio, independientemente del tipo de consumo de que se trate, interesa conocer su estructura y qué aspectos de la misma tienen mayor peso en el total, de modo que, aplicando estrategias sobre estos elementos, se pueda reducir la demanda para la mejora su sostenibilidad por la reducción de los consumos. Esto se desarrolla en el artículo publicado en el marco de este proyecto (Gil-Baez et al., 2019) con el enfoque de analizar cuestiones relacionadas con la mejora de la envolvente de los edificios con soluciones pasivas.

### 1.1.1 Métodos y sistemas

Para conocer la estructura de la demanda de energía e identificar oportunidades de mejora de la sostenibilidad del tipo de edificio, se aplica la siguiente metodología:

- **Análisis teórico de la estructura de la demanda.** Se realiza utilizando simulaciones informáticas, desglosándose la estructura de la demanda del edificio desde un enfoque teórico. Los resultados se encuentran publicados en el artículo de la revista Energy (Gil-Baez et al., 2019), donde se analizan las condiciones de la demanda de un edificio escolar prototipo en clima Mediterráneo, en relación a las

oportunidades de reducción del consumo e incremento de su eficiencia energética, desde el enfoque de la mejora de las envolventes con soluciones pasivas ("Passive actions in the building envelope to enhance the sustainability of schools in Mediterranean climate" (Gil-Baez et al., 2019). Energy. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.094>).

- i. **Validación de resultados.** La validación de los resultados anteriores se realiza por dos vías: por un lado con datos de otras simulaciones realizadas en diversas zonas climáticas y por otro con datos obtenidos "in situ" de la campaña de monitorización. Ambos grupos de datos se encuentran publicados por los miembros del equipo de investigación del proyecto ClimAct (Gil-Baez et al., 2017) (Lizana et al., 2018).

### 1.1.2 Edificio modelo

Se analiza un edificio teórico prototipo como modelo de la tipología utilizando herramientas de libre acceso (Lider (Ministerio de Fomento, n.d.), Visol (RV Burke, n.d.)). El proceso de análisis y los resultados se exponen en la publicación (Gil-Baez et al., 2019), donde se detallan pormenorizadamente las condiciones de demanda de un edificio escolar tipo, en relación a las oportunidades de mejora de la eficiencia energética utilizando acciones pasivas en la envolvente. El edificio analizado presenta materiales tradicionales y soluciones típicas de este tipo de construcciones (Consejería de Educación y Ciencia. Junta de Andalucía, 2003) y se encuentra ventilado naturalmente (Ministerio de Economía y Hacienda, Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, & Ministerio de Economía y Hacienda, 1998). Se ubica en zona A4, siendo representativo de severidad climática de verano. Los resultados se contrastan con aquéllos obtenidos en el desarrollo del proyecto CimAct ("ClimAct. Transition to a low carbon economy in schools," 2017), cuyo objetivo es analizar la reducción de la huella de carbono en los edificios de uso escolar. El edificio modelizado y las condiciones climáticas se representan en la Fig.5.1.

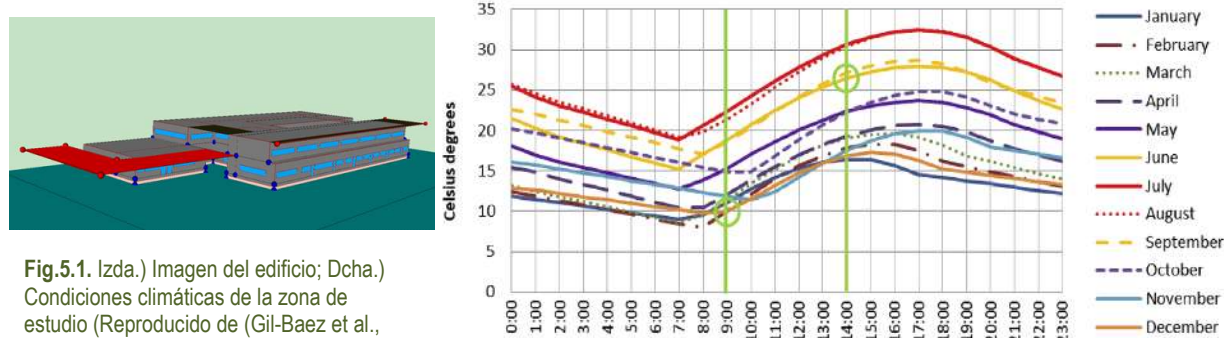


Fig.5.1. Izda.) Imagen del edificio; Dcha.) Condiciones climáticas de la zona de estudio (Reproducido de (Gil-Baez et al., 2019))

### 1.1.3 Resultados y validación

- i. **Estructura de la demanda.** La demanda neta en kWh/m<sup>2</sup> obtenida para el edificio modelo, se muestra desglosada por meses y por componentes en la Fig.5.2.

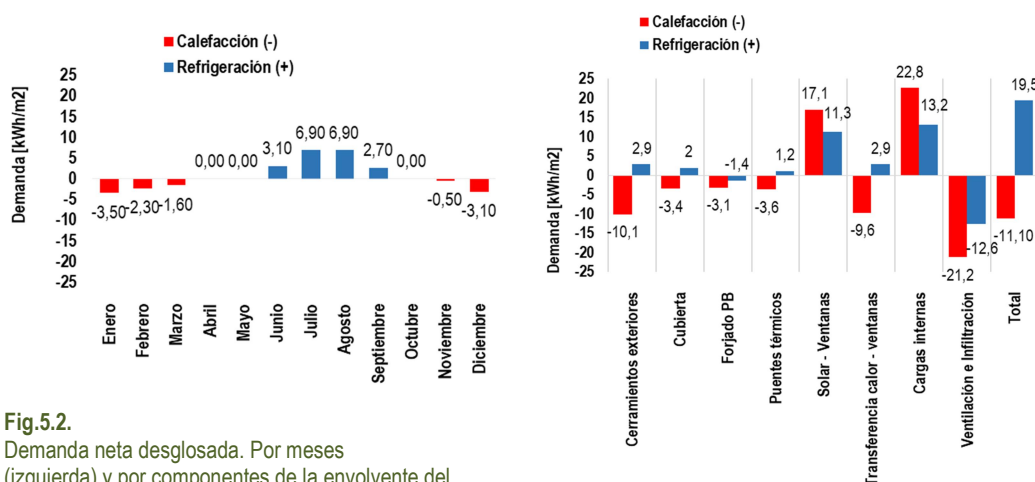


Fig.5.2. Demanda neta desglosada. Por meses (izquierda) y por componentes de la envolvente del edificio (derecha) (Reproducido de (Gil-Baez et al., 2019))

- ii. Validación. Los resultados obtenidos con las herramientas informáticas se validan mediante una calibración a través de dos vías: i) Primero, se comparan los resultados con los obtenidos en un trabajo publicado previamente (Gil-Baez et al., 2017), donde se analizó el comportamiento de un edificio prototipo simulado con Designbuilder ("DesignBuilder Software Ltd - Home," n.d.) en cada sub-zona climática de Andalucía (Fig.5.3.a); ii) en segundo lugar, se comparan con datos reales de consumo obtenidos de facturas de 9 escuelas analizadas en el Proyecto ClimAct ("ClimAct. Transition to a low carbon economy in schools," 2017) (Fig.5.3.b). En la Figura 5.3 se muestran las demandas totales anuales en cada caso y por m<sup>2</sup>.

a)			b)	
Uso energía Final			CENTRO ESCOLAR	Uso energía Final ( kWh/m <sup>2</sup> año)
ZC	kWh	kWh/m <sup>2</sup> año		
B4	66.446,64	16,29	E1	46,63
A3	55.244,97	13,55	E2	24,56
C4	79.323,18	19,45	E3	26,26
C3	89.073,80	21,84	E4	30,22
A4	49.111,57	12,04	E5	12,05
			E6	24,15
			E7	19,78
			E8	29,73
			E9	27,53
			promedio	26,76

Fig.5.3. a) Uso de energía kWh/m<sup>2</sup> año, según datos obtenidos de (Gil-Baez et al., 2017) y b) consumo de energía en kWh/m<sup>2</sup> año (datos de facturas)

Para validar los datos obtenidos en el edificio modelo, representados en la Fig.5.2, y poderlos comparar con los de la Fig.5.3, se excluyen del valor obtenido de la demanda total los meses de julio y agosto (resultando 16,8 kWh/m<sup>2</sup> año).

Si comparamos los resultados obtenidos para el modelo, representados en la Fig. 5.2 (16,8 kWh/m<sup>2</sup> año para calefacción y refrigeración a lo largo del año escolar, sin considerar julio y agosto), con los representados en la Fig.5.3 para un edificio prototipo simulado con Designbuilder en cada una de las zonas climáticas de Andalucía, se comprueba que hay una desviación de solo 0,17 kWh/m<sup>2</sup> año en comparación con el promedio (16,63 kWh/m<sup>2</sup> año). Si analizamos la desviación de los resultados de ambas simulaciones en la misma zona sub-climática A4 la desviación es de 4,76 kWh/m<sup>2</sup> año. Esta es mayor debido a que los resultados de la Fig.5.3.a) se obtienen para un edificio con una superficie bruta más alta y, por lo tanto, con una relación de demanda de energía menor por metro cuadrado, debido a la diferencia en el factor de forma de pérdida de calor (área de superficie/volumen).

En el segundo caso, si se comparan los resultados de la simulación del modelo representados en Fig.5.2 (16,8 kWh/m<sup>2</sup> año para calefacción y refrigeración a lo largo del año escolar, sin considerar julio y agosto), con los de las facturas reflejados en la Fig.5.3.b), se observa una desviación mayor (-9,86 kWh/m<sup>2</sup> año en comparación con el promedio y +4,75 comparado con el edificio E5, con menor consumo). Esto es debido a la diferencia en la época de construcción de los edificios y sus instalaciones, la falta de mantenimiento y el inadecuado uso de las instalaciones.

Las calibraciones muestran la correlación de los resultados, con unas ratios de consumo que oscilan en el entorno de los 20 kWh/m<sup>2</sup> año. Por tanto, los resultados obtenidos con el modelo que se analiza son acordes y pueden considerarse validados para proceder al análisis del desglose de la demanda por componentes.

#### 1.1.4 Análisis y discusión

- i. **Análisis de los resultados por meses (Fig.5.2.izda).** Según el gráfico de la Fig.5.2 (izda.) se obtiene una demanda total para el año completo de 30,7 kWh/m<sup>2</sup>. Dentro de la misma, el valor correspondiente a refrigeración es mayor que para calefacción (19,6 kWh/m<sup>2</sup> versus 11,1 kWh/m<sup>2</sup>), lo cual se corresponde con las severidades climáticas de invierno y verano (A y 4). Estos resultados se encuentran dentro de los ratios de consumo esperables en la región (Lizana et al., 2018).

En la demanda de refrigeración se observa una clara correlación con las temperaturas máximas anuales. Como se observa en la Fig.5.1 dcha.) (evolución horaria de la temperatura media por meses para un día típico en zona A4),

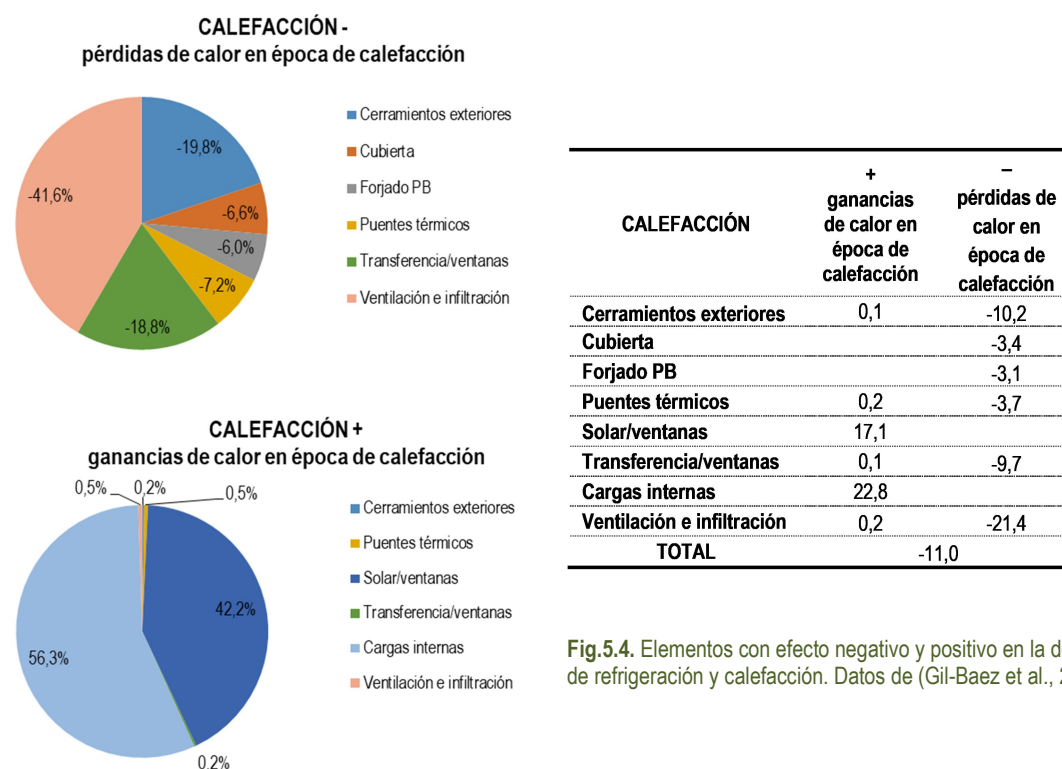
las máximas se alcanzan en los meses de Julio y Agosto (sobre los 30°C), cuando se produce la mayor demanda de energía (6,9 kWh/m<sup>2</sup>). Sin embargo, cuando esto sucede, las escuelas están cerradas según el calendario escolar actualmente vigente. En cuanto a la demanda de calefacción, a pesar de estar en zona climática A, esta se refleja de noviembre a marzo. En abril, mayo y octubre, la temperatura se mantiene entre los 12°C y 23°C durante la jornada lectiva, con máximas entre 21°C and 24,3°C y mínimas entre 11,9°C and 15,7°C, obteniéndose un balance neutro entre ganancias y pérdidas en estos meses.

Independientemente del confort térmico, y desde el enfoque de la CAI, aunque hay meses con una demanda nula desde el punto de vista térmico de pérdidas y ganancias de calor, debe garantizarse un adecuada CAI, con una adecuada renovación del aire. Dado que el edificio analizado es una escuela, con elevada densidad de ocupación en las aulas, la ventilación es necesaria para mantener los niveles de contaminantes bajo límites aceptables durante todo el periodo de ocupación.

ii. **Análisis de los resultados por componentes.** Analizando los resultados de la Fig.5.2 (derecha) se aprecian 3 tipos de comportamiento en los componentes de la envolvente:

- Componentes que contribuyen en la demanda de calefacción o de refrigeración según la estación. Esto sucede con los cerramientos exteriores (-10,1 kWh/m<sup>2</sup>; 2,9 kWh/m<sup>2</sup>), así como con la cubierta (-3,4 kWh/m<sup>2</sup>; 2 kWh/m<sup>2</sup>), los puentes térmicos (-3,6 kWh/m<sup>2</sup>; 1,2 kWh/m<sup>2</sup>), y la transferencia de calor por las ventanas (-9,6 kWh/m<sup>2</sup>; 2,9 kWh/m<sup>2</sup>).
- Componentes que contribuyen a la demanda de calefacción en invierno pero presentan un “comportamiento refrigerante” en verano. El suelo de la planta baja, (-3,1 kWh/m<sup>2</sup>; -1,4 kWh/m<sup>2</sup>) y la ventilación y la infiltración (-21,2 kWh/m<sup>2</sup>; -12,6 kWh/m<sup>2</sup>) ofrecen una acción positiva en verano, colaborando en la reducción de la demanda de refrigeración.
- Componentes que incrementan la demanda de refrigeración en verano pero reducen la necesidad de calefacción en invierno, como la radiación solar a través de las ventanas (17,1 kWh/m<sup>2</sup>; 11,3 kWh/m<sup>2</sup>) y las cargas internas (22,8 kWh/m<sup>2</sup>; 13,2 kWh/m<sup>2</sup>).

Por tanto, la eficiencia energética del edificio puede mejorarse trabajando en acciones de mejora sobre estos elementos. En las Fig.5.4 y Fig.5.5 se muestran los elementos con efecto positivo y negativo en la demanda de calefacción y refrigeración.

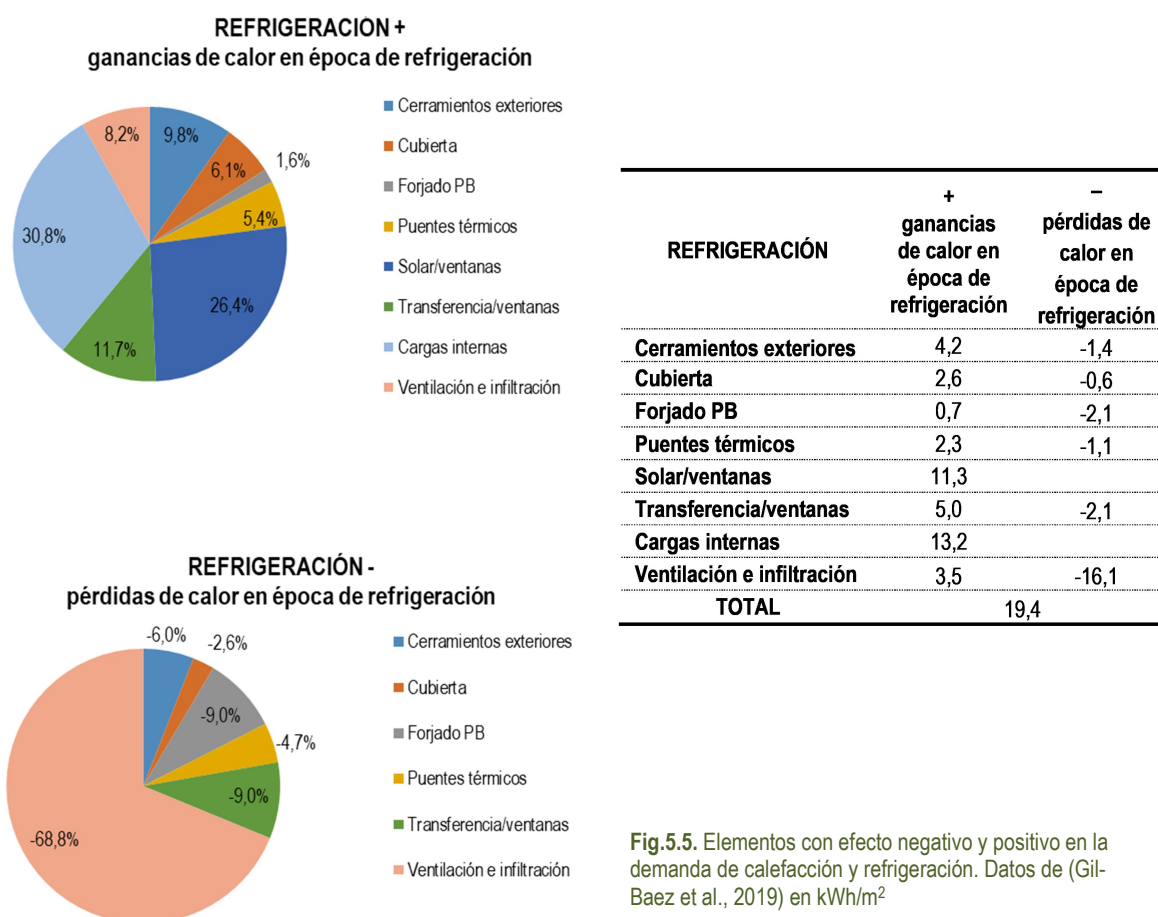


**Fig.5.4.** Elementos con efecto negativo y positivo en la demanda de refrigeración y calefacción. Datos de (Gil-Baez et al., 2019)



Analizando los elementos con mayor peso, el efecto de la radiación solar a través de las ventanas presenta un efecto positivo en invierno ( $17,1 \text{ kWh/m}^2$ ), pero negativo en verano ( $11,3 \text{ kWh/m}^2$ ). No obstante, una ventana en un colegio sin protección solar no es práctica y presenta un efecto negativo la mayor parte del tiempo lectivo con sol, debido a los deslumbramientos. Por lo tanto, deberían considerarse protecciones solares en los modelos de cálculo, aunque el efecto “positivo” que pueda tener la radiación solar en el confort térmico en invierno no se explote completamente.

En relación a las ganancias internas, se observa cómo presentan un efecto positivo en invierno (56,3%), mientras que conllevan demanda de refrigeración en verano. Este sobrecalentamiento interior debido a la ocupación y a la radiación solar se puede reducir utilizando estrategias de refrigeración pasiva sin usar energía convencional.



**Fig.5.5.** Elementos con efecto negativo y positivo en la demanda de calefacción y refrigeración. Datos de (Gil-Baez et al., 2019) en  $\text{kWh/m}^2$

Por último se observa cómo la ventilación supone una reducción de la demanda de refrigeración de  $-12,6 \text{ kWh/m}^2$ , a la vez que contribuye a garantizar la CAI. Por lo que incrementando el caudal de ventilación en verano se pueden mejorar las condiciones de confort, mientras que en invierno la tasa de ventilación debe reducirse al mínimo imprescindible para garantizar la CAI y que no suponga una pérdida excesiva en las cargas de calefacción.

Si se centra el análisis en la envolvente (cerramientos y cubierta) y considerando que hay transferencia de calor en invierno y en verano y demanda de energía en ambos casos, este efecto se puede mejorar incrementando el aislamiento, tanto de los cerramientos como de los huecos. Sin embargo, en el caso del suelo de planta baja, aunque afecta a la demanda de calefacción en invierno ( $-3,1 \text{ kWh/m}^2$ , representa solo el 6% de la demanda de calefacción en invierno) y en verano su efecto es positivo ( $-2,1 \text{ kWh/m}^2$  en refrigeración, lo cual supone el 9% de las pérdidas de calor en refrigeración). Los puentes térmicos también tienen una repercusión relativamente baja, suponiendo sólo el 7% de las oportunidades de mejora en la calefacción y el 4% en las de refrigeración. A esto hay que añadir el elevado coste constructivo que representa evitarlos en algunos casos.

Visto lo anterior, puede afirmarse que aplicando en el diseño las medidas adecuadas, en base al conocimiento del consumo del edificio y la demanda debida a sus componentes, se puede diseñar un edificio menos dependiente de las instalaciones y por tanto más sostenible. Las oportunidades de mejora en los elementos de la envolvente del edificio, en base a los datos analizados anteriormente quedan como se muestra en la Fig.5.6.

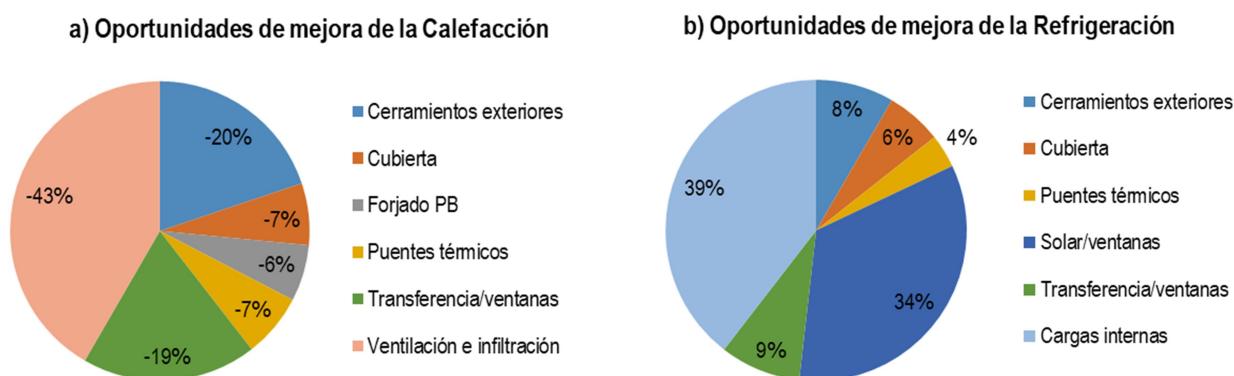


Fig.5.6. Opciones de mejora en la demanda de energía: a) oportunidades de mejora de calefacción; b) oportunidades de mejora en la refrigeración

### 1.1.5 Conclusiones

Del análisis del conjunto de datos obtenidos, puede concluirse, en relación a la estructura de la demanda de energía de los edificios escolares analizados que los consumos tipo son muy bajos en comparación con otro tipo de edificios u otras localizaciones (30 kWh/m<sup>2</sup> frente a 280 kWh/m<sup>2</sup>), por lo que si no se quiere aumentar el impacto de estos edificios en el consumo de energía y su huella de carbono, al menos habría que mantener el ratio de consumo característico obtenido, no incorporando instalaciones o soluciones constructivas que lo incrementen. Por su parte, la ventilación tiene un impacto importante en la demanda de consumo de los centros. Siendo un requisito para la salubridad, deben buscarse soluciones de ventilación que no consuman energía.

Como última reflexión, hay que tener en cuenta que según el calendario escolar, hay habitualmente dos semanas de vacaciones en diciembre (navidad), y otra en marzo-abril (semana santa). Además, la actividad escolar se desarrolla de lunes a viernes, durante un promedio de 5 horas lectivas. Esto implicaría una demanda real inferior a la mostrada en los gráficos, ya que la aplicación de cálculo considera un régimen de funcionamiento más amplio, tal como se muestra en la Fig.5.7.

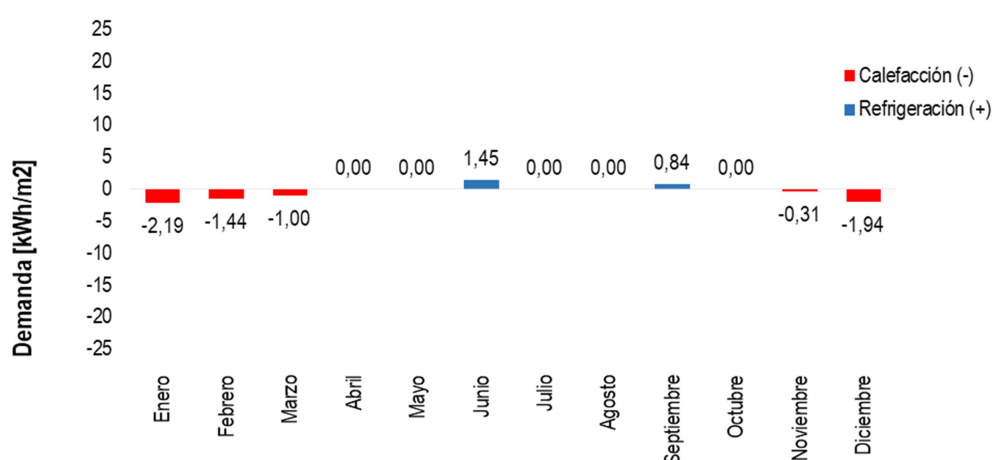


Fig.5.7. Demanda real considerando el cierre del verano y el régimen de ocupación de 5 horas diarias

## 1.2 Calidad del aire

Para caracterizar la Calidad del Aire es necesario analizar las condiciones del interior de las aulas, junto con las del ambiente exterior de cada implantación. En el marco del proyecto ClimAct ("ClimAct. Transition to a low carbon economy in schools," 2017) se ha llevado a cabo una campaña de medidas en escuelas del ámbito mediterráneo de las que 9 se ubican en Andalucía. Estas se seleccionaron como representativas del parque público escolar edificado en términos de tipología, materiales y sistemas constructivos y época de construcción. Para maximizar la información a obtener, se seleccionan aulas con diferentes características y orientaciones, edad de los estudiantes y calendario de funcionamiento. Parte de los resultados obtenidos han sido publicados recientemente en "Journal for Cleaner Production" con el título "Identification of potential indoor air pollutants in schools" (Lizana et al., 2020), del que la doctoranda es coautora ("Identification of potential indoor air pollutants in schools" (Lizana et al., 2020). Journal of Cleaner Production. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118420>).

### 1.2.1 Metodología

La metodología para la obtención de datos se ha llevado a cabo según la siguiente secuencia: i) Identificación de los parámetros a analizar y niveles de referencia; ii) Diseño de la campaña de medias (incluyendo la selección de los equipos de medida, los medios de ensayo y los centros y las aulas a ensayar); iii) Toma de medidas interiores y exteriores. Los sistemas empleados consisten en equipos de medida y herramientas informáticas para el procesado de datos, descritos pormenorizadamente en el Capítulo 3 Metodología.

- i. **Identificación de los parámetros a analizar y niveles de referencia.** Los parámetros que se seleccionan para analizar son: **A. Contaminantes químicos:** compuestos orgánicos volátiles (COV) como representativos de los contaminantes de naturaleza química; **B. MP**, representativas de las partículas en suspensión, de tamaños PM10 y PM 2,5 y **C. Nivel de CO<sub>2</sub>** como indicador global de la calidad del aire. Se toman además datos relativos al confort como la temperatura y humedad relativa.

Para el análisis de resultados se adoptan los niveles de referencia para concentraciones interiores recogidos en la Tabla 5.2. Cuando, según lo expuesto en el Capítulo 4, existen varios valores según distintas normativas, se ha tomado el más restrictivo para el caso de contaminantes. Para la evaluación del CO<sub>2</sub> como indicador se han tomado las referencias de la norma inglesa, específica para edificios escolares con VN. El análisis de los valores y contaminantes se encuentran publicados como parte del artículo "Identification of potential indoor air pollutants in schools" (Lizana et al., 2020), , del que la doctoranda es coautora.

**Tabla 5.2.** Valores de referencia. A. contaminantes químicos; B. Materia Particulada; C. CO<sub>2</sub>

Contaminante	Unidad	Límite	Guía
COVt	µg/m <sup>3</sup>	<600 (promedio durante ocupación)	Legislación portuguesa (Decreto-Lei n.º 78, 2006; Decreto-Lei n.º 79, 2006; Portaria n.º 353-A, 2013)
Benzeno	µg/m <sup>3</sup>	<1,7 (exposición prolongada)	Mandin Et al. OMS (Mandin et al., 2009) (WHO, 2010)
Trichloroetileno	µg/m <sup>3</sup>	<20 (exposición prolongada)	Norma francesa ANSES 2011[63,64]
Tolueno	µg/m <sup>3</sup>	<250 (máxima referencia)	Legislación portuguesa (Portaria n.º 353-A, 2013)
Tetrachloroetileno	µg/m <sup>3</sup>	<250 (máxima referencia)	Legislación portuguesa (Portaria n.º 353-A, 2013)
Ethylbenzeno	µg/m <sup>3</sup>	<850	UE- valores LCI (European Commission, 2016)
o+m+p-xileno	µg/m <sup>3</sup>	<500	UE- valores LCI (European Commission, 2016)
Styreno	µg/m <sup>3</sup>	<30 (máxima referencia)	Norma alemana (Umweltbundesamt, 2018)
Alpha-pineno	µg/m <sup>3</sup>	<200	Norma alemana (Umweltbundesamt, 2018)
1,4-dichlorobenzeno	µg/m <sup>3</sup>	<150	UE- valores LCI (European Commission, 2016)
Formaldehído	µg/m <sup>3</sup>	<50 (exposición de 2 horas)	Norma francesa ANSES2011 (ANSES, n.d., 2011; Mandin et al., 2009)
Acetaldehído	µg/m <sup>3</sup>	<160 (exposición > 1 año)	Norma francesa ANSES 2014 (ANSES, n.d., 2014)
Acroleína	µg/m <sup>3</sup>	<0,8	Norma francesa, ANSES 2011 (ANSES, n.d., 2011), Ramalho et al (Ramalho et al., 2015)
Propanal	µg/m <sup>3</sup>	no guideline	-
Butanal	µg/m <sup>3</sup>	<650	UE- valores LCI (European Commission, 2016)
Benzaldehído	µg/m <sup>3</sup>	<20	Norma alemana (Umweltbundesamt, 2018)
Isopentanal	µg/m <sup>3</sup>	no guideline	-
Pentanal	µg/m <sup>3</sup>	<800	UE- valores LCI (European Commission, 2016)
Hexanal	µg/m <sup>3</sup>	<900	UE- valores LCI (European Commission, 2016)

(Continuación) Tabla 5.2. Valores de referencia. A. contaminantes químicos; B. Materia Particulada; C. CO<sub>2</sub>

B.	Contaminante		Unidad	Límite	Guía
	PM10	µg/m³	<50 (promedio durante la ocupación)	Legislación portuguesa (Portatia nº 353-A, 2013)	
	Out PM10	µg/m³			
	PM <sub>2.5</sub>	µg/m³	<25 (promedio durante la ocupación)	Legislación portuguesa (Portatia nº 353-A, 2013)	
	Out PM2.5	µg/m³			

C.	Unidad		Límite	Guía
	CO <sub>2</sub>		<1500 (valor promedio) durante el periodo de ocupación con ventilación natural. Tolerancia hasta 2000 ppm hasta 20 minutos	Norma inglesa para edificios escolares con VN (BB 101 (EFA, 2016))
		ppm		

- ii. **Diseño de la campaña de medidas.** La campaña de medidas se desarrolla en la estación intermedia (marzo). El periodo se caracteriza con temperaturas que oscilan entre los 10°C a primera hora de la mañana (8:00) y los 20°C al finalizar la jornada (15:00) en el caso de educación secundaria.

Se realizan dos tipos de medidas del aire interior: i) medidas continuas de temperatura, humedad, CO<sub>2</sub>, partículas y COVt a lo largo de dos jornadas consecutivas y ii) medidas pasivas de COV a lo largo de una semana. Se toman también medidas exteriores en continuo al principio y al final de la jornada escolar en cada una de las localizaciones para establecer valores de referencia de los niveles interiores (CO<sub>2</sub>, temperatura, humedad, COVt y partículas). El desarrollo de las medidas se realiza a lo largo de 2 jornadas lectivas durante todo el periodo de ocupación del aula para el caso de las medidas tomadas en continuo y de 5 días para las medidas pasivas. Las medidas en continuo se graban cada 2 minutos para detectar las posibles variaciones u oscilaciones con mayor precisión. En ellos, se monitorizaron simultáneamente dos aulas por centro.

**Selección de los centros.** Los 9 centros seleccionados corresponden a diferentes niveles de enseñanza y ubicación geográfica ubicados en Andalucía y seleccionados como representativos del clima mediterráneo. Los primeros criterios de selección fueron la localización y la accesibilidad, así como la representatividad de distintas situaciones urbanas, según se recoge muestra en la Fig.5.8 y se resume en la Tabla 5.3. En la primera localización se representan entornos típicos urbanos, suburbanos y rurales (Fig.5.8.izda.). La segunda localización representa una situación urbana en zona de montaña (Fig.5.8.dcha).

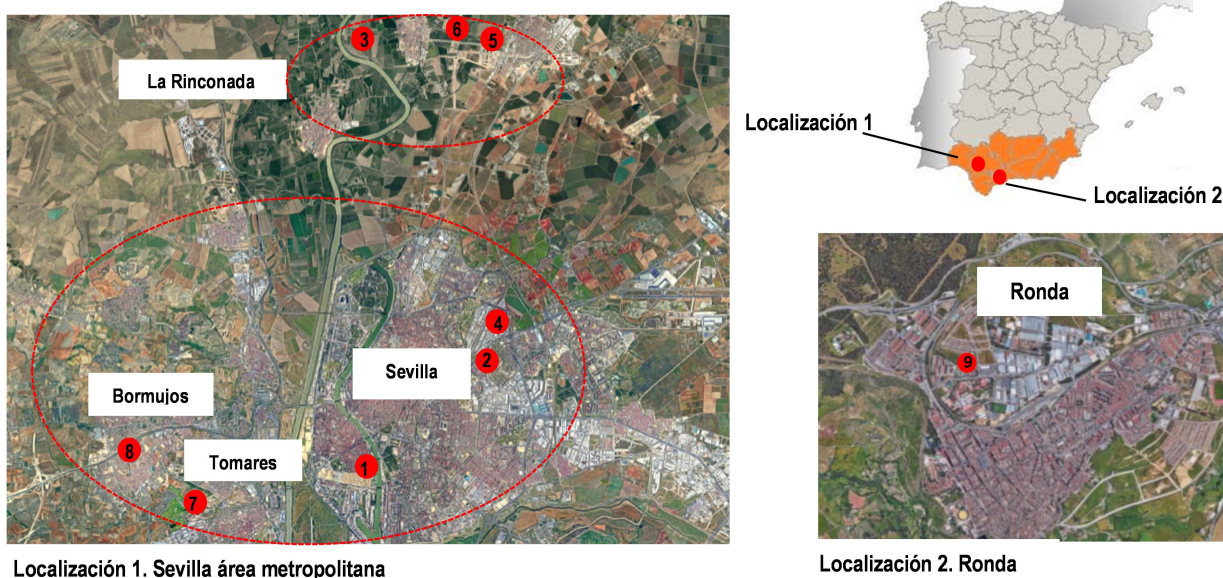


Fig.5.8. Localización de los centros. (fuente: elaboración propia)



**Tabla 5.3.** Clasificación de los centros según su localización y nivel educativo (1 I:Infantil (3-6 años); P:Primaria (6-12 años); S:Secundaria (12-16 años); B:Bachillerato (17-18); CF (>18))

Centro	Centro urbano	Periferia urbana	Zona suburbana área metropolitana	Centro urbano rural	Periferias entorno rural	Área de montaña	Nivel educativo <sup>1</sup>
E1				X			I+P
E2				X			I+P
E3		X					I+P
E4					X		I+P
E5		X					S
E6			X				S
E7			X				S+B
E8	X						S+B
E9				X			S+B+CF

Los edificios siguen las pautas de diseño de los que componen el parque público (Capítulo 4). Se han seleccionado siguiendo criterios de representatividad de diferentes tipologías y épocas de construcción. Sus características se resumen en la Tabla 5.4 y se muestran en las Figs.5.9 y 5.10. Los materiales empleados en la construcción de las edificaciones analizadas son no emisivos. Las características constructivas de las aulas ensayadas se reflejan en la Tabla 5.5.



**Fig.5.9.** Centros de educación infantil y primaria. (fuente: elaboración propia)

**Tabla 5.4.** Características de la edificación

Centro	Datos edificio			Datos alumnos	
	Sup const. (m²)	Nº plantas	Año construcción	Nº alumnos	
E1	750	1	2013	160	
E2	2680	2	2003	372	
E3	1150	3	1979	672	
E4	2540	2	1973	706	
E5	5189	3	2013	950	
E6	1292	2	2008	486	
E7	3800	2	1999	801	
E8	1985	3	1986	759	
E9	13104	3	1979/1982	1050	



**Fig.5.10.** Centros de educación secundaria. (fuente: elaboración propia).

Tabla 5.5. Características constructivas

Centro	Características constructivas del aula					
	Tipo de aula	Suelo	Paredes	Techo	Protección solar	Sistema de ventilación
E1	2 x I	PVC	PP	FT	LO	SVM sin uso / operan con infiltraciones y apertura de ventanas
E2	1 I+1 P	T/PP	PP	PP	PE	Infiltraciones y apertura de ventanas
E3	2 x P	T	PP	PP	LO	Infiltraciones y apertura de ventanas
E4	1 I+1 P	T	PP	PP	PE	Infiltraciones y apertura de ventanas
E5	2 x S	T	PP	FT	LO	SVM sin uso / operan con infiltraciones y apertura de ventanas
E6	2 x S	T	PP	SFT	LO	Infiltraciones y apertura de ventanas
E7	2 x S	T	PP	SFT	PE	Infiltraciones y apertura de ventanas
E8	2 x S	T	PP	SFT	LO	Infiltraciones y apertura de ventanas
E9	2 x B	T	PP	SFT	PE	Infiltraciones y apertura de ventanas

LO Lamas orientables; PE persiana enrollable; T baldosas de terrazo; PVC suelo de PVC; PP pintura plástica; SFT sin falso techo; FT con falso techo

El desarrollo de la actividad lectiva en los centros seleccionados se rige por el régimen estándar de uso y funcionamiento descrito en el Capítulo 4 que se resume en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Régimen de funcionamiento

Tipo de centro	Horario	Nº alumnos por aula	Tamaño del aula
Infantil y Primaria	9:00-14:00	25	50 m <sup>2</sup>
Secundaria	8:00-15:00	30	60 m <sup>2</sup>

Ocupación en todos los centros de lunes a viernes y de septiembre a junio siguiendo el calendario lectivo anual

- iii. **Toma de datos.** En los centros seleccionados se monitorizan simultáneamente 2 aulas por centro. El desarrollo de las medidas se realiza a lo largo de 2 jornadas lectivas durante todo el periodo de ocupación del aula para el caso de las medidas tomadas en continuo y de 5 días para las medidas pasivas. Las medidas en continuo se graban cada 2 minutos para detectar las posibles variaciones u oscilaciones con mayor precisión. Los tipos de ensayo realizado en cada aula se representan en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Ensayos por centro y aula

Centro	Aula	Medidas en continuo					Medidas pasivas		
		CO <sub>2</sub> (ppm)	H (%)	TEMP (°C)	COVt (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	COV	Aldehidos
E1	1	X	X	X	X			X	X
	2	X	X	X		X	X	X	X
E2	1	X	X	X	X			X	X
	2	X	X	X		X	X	X	X
E3	1	X	X	X	X			X	X
	2	X	X	X		X	X	X	X
E4	1	X	X	X	X			X	X
	2	X	X	X		X	X	X	X
E5	1	X	X	X	X			X	X
	2	X	X	X		X	X	X	X
E6	1	X	X	X	X			X	X
	2	X	X	X		X	X	X	X
E7	1	X	X	X	X			X	X
	2	X	X	X		X	X	X	X
E8	1	X	X	X	X			X	X
	2	X	X	X		X	X	X	X
E9	1	X	X	X	X			X	X
	2	X	X	X		X	X	X	X
E10	1	X	X	X	X			X	X
	2	X	X	X		X	X	X	X

**Medidas en continuo (CO<sub>2</sub>, temperatura, humedad, partículas y COVt).** Se realizan medidas interiores y exteriores. El proceso de monitorización se supervisó por un investigador para recoger la información relativa a la ocupación del aula, la ventilación y el comportamiento y las actividades de los usuarios. Durante las clases los estudiantes se implicaron en identificar cualquier cambio que se produjese en relación a las actividades, la ocupación, la apertura de ventanas y puertas o cualquier otra circunstancia que pudiera afectar a las medidas.

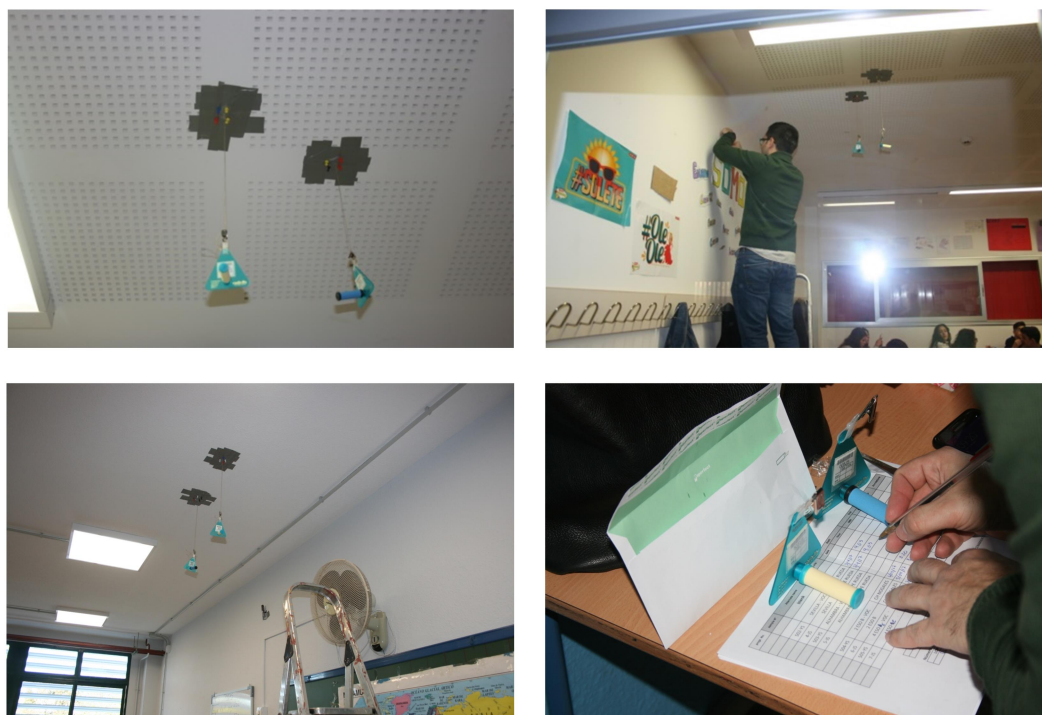




**Fig.5.11.** Ubicación del equipo de medida. Izda.) exterior; dcha.) interior. (fuente: elaboración propia)

En el interior los equipos de medida se ubican en las aulas en la zona de ocupación (aproximadamente a 1 m del suelo). Así mismo, se localizan retiradas al menos 2 metros de cualquier paramento, ventana, puerta o sistema activo de calefacción (Fig.5.11 dcha.). En el exterior se toman medidas al principio y al final de la jornada de medidas para obtener las magnitudes de referencia. Los aparatos de medida se dispusieron en una localización representativa en del acceso principal del centro. (Fig.5.11 izda.).

**Medidas pasivas.** El análisis pasivo de la CAI se llevó a cabo utilizando cartuchos adsorbentes (Fig.5.12), detallados en la Tabla 6, para medir un conjunto de aldehídos y compuestos orgánicos volátiles específicos. Los equipos de medida se detallan en mayor profundidad en el Capítulo metodología. Se tomaron dos muestras por punto de muestreo para verificar las mediciones, utilizándose una muestra en blanco para garantizar que las muestras no se contaminaron durante el proceso de la instalación en las aulas o el transporte al laboratorio.



**Fig.5.12.** Localización equipo medidas interiores, arriba) en continuo; abajo) medidas pasivas (passive sampler). (fuente:propia)

**Selección de los equipos de medida y los medios de ensayo.** Las principales características de los dos tipos de equipos de medida se detallan en las Tablas 5.8 y 5.9. Los análisis fueron realizados por el laboratorio ICSM, utilizando cartuchos de Sigma-Aldrich.

**Tabla 5.8.** Ensayos por centro y aula (Equipos portátiles de medida en continuo (utilizados en interior y exterior))

Equipo	Intervalo de medida	Variables	Rango de medida
Delta OHM HD 21ABE17	2 minutos	CO <sub>2</sub> dióxido de carbono (ppm)	0...5000 ppm
		CO monóxido de carbono (ppm)	0...500 ppm
		Presión atmosférica (Pa)	750...1100 hPa
		Humedad relativa (%)	0...100 % RH
		Temperatura (°C)	-20...+60 °C
Optical Particle Sizer OPS 3330	2 minutos	Número y tamaño de partículas (en 10 canales de medida)	0.3 – 10 µm
TVOC 103	2 minutos	TVOC (ppb)	5 a 20,000 ppb

**Tabla 5.9.** Dispositivos passive samplers (para conocer los niveles ambientales de compuestos orgánicos volátiles y formaldehídos)

Equipo	Intervalo de muestreo	Compuestos	Método de análisis
VOC adsorbent cartridges (Radial passive sampler RAD145)	5 días (muestreo difusivo)	Benzene, Trichloroethylene, Toluene, Tetrachloroethylene, Ethylbenzene, m+p-xylene, Styrene, o-xylene, Alpha-pinene, 1,4-dichlorobenzene	Thermal desorption HRGC-MS
Aldehyde adsorbent cartridges (Radial passive sampler RAD165)	5 días (muestreo difusivo)	Formaldehyde, Acetaldehyde, Acrolein, Propanal, Butanal, Benzaldehyde, Isopentanal, Pentanal, Hexanal	Solvent extraction (acetonitrile) HPLC-UV

HRGC: cromatografía de gases de alta resolución. MS: espectrometría de masas. HPLC: cromatografía líquida de alto rendimiento. UV: ultravioleta.

**Selección de las aulas de ensayo.** La selección de las aulas se realiza con criterios de diversidad para obtener la máxima información. Así, se identifican diferentes plantas y orientaciones y niveles educativos. En la Tabla 5.5 se resume el tipo de material empleado en los revestimientos interiores de las aulas analizadas. Se incluye también el tipo de protección solar de las ventanas, la cual incide en las condiciones de ventilación e iluminación del aula. Sólo en una de las aulas el suelo es de PVC. Disponen de protecciones solares que pueden ser de dos tipos: lamas orientables o persianas enrollables. En todas las aulas hay ventanas practicables manualmente para garantizar la ventilación.

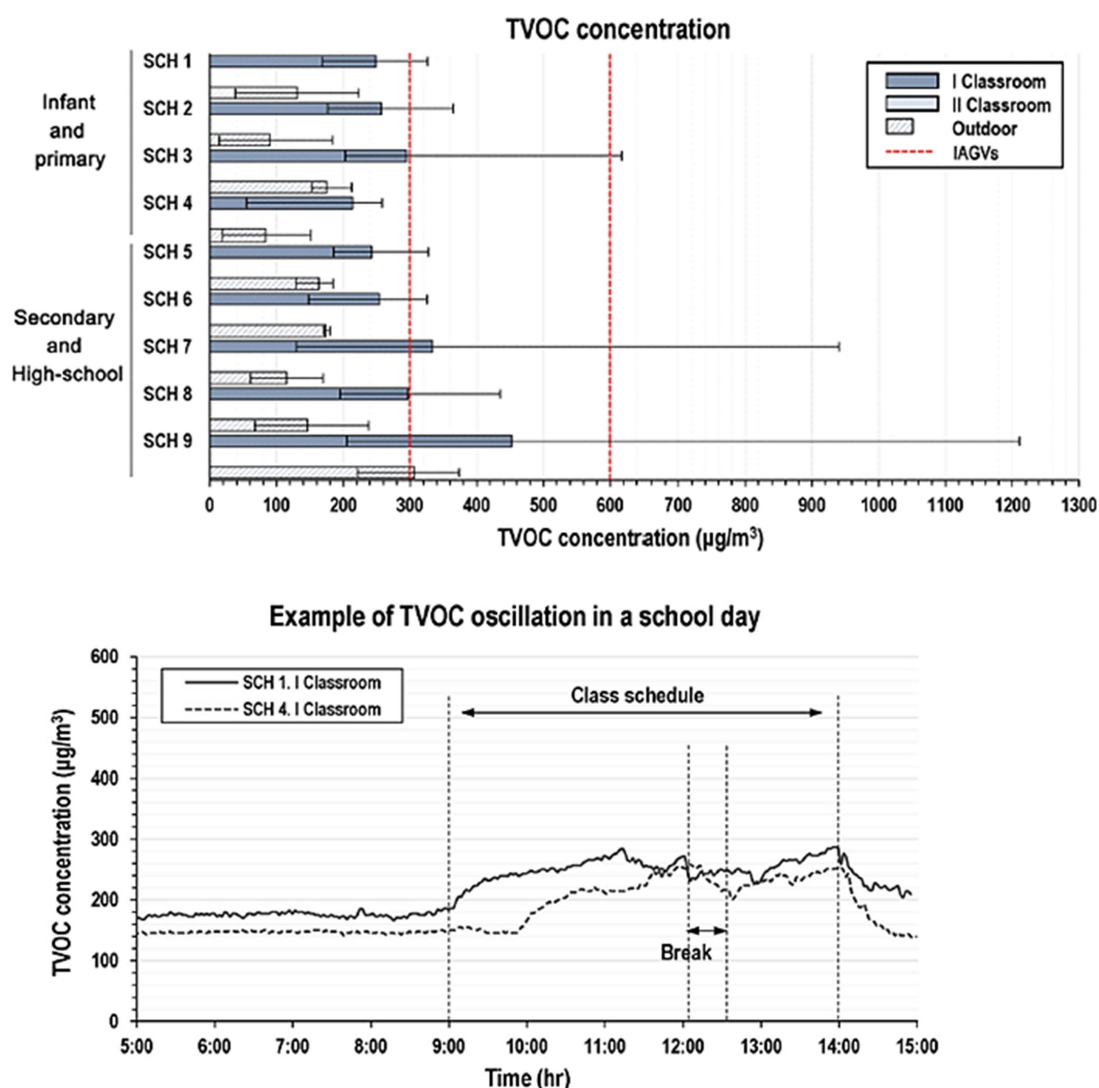
**Fig.5.13.** Tipos de ventanas: arriba) exteriores (protección solar lamas izda. y persianas dcha.; abajo) interiores a pasillo (apertura abatible izda. y corredera dcha.) (fuente: elaboración propia)

En todos los casos es posible realizar estrategias de ventilación a una cara, siendo además posible en alguno de ellos realizar la ventilación cruzada utilizando ventanas practicables dispuestas en los paramentos a los pasillos. Los tipos de ventanas se muestran en la Fig.5.13.

## 1.2.2 Resultados

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes figuras y tablas (Fig.5.14 y Tablas 5.10 y 5.11 contaminantes químicos; Fig.5.15 MP; Fig.5.16 CO<sub>2</sub>).

**A. Contaminantes químicos.** Estos se midieron con un equipo en continuo que da información sobre la dinámica de concentración (Fig.5.14) y con sistemas pasivos, para valores medios de concentración del aire interior de un conjunto de aldehídos y COV específicos (Tablas 5.10 y 5.11). Esta técnica proporciona información detallada según el componente de los valores acumulados durante el periodo de medida, mientras que la medición continua no discrimina.



**Fig.5.14.** Compuestos orgánicos volátiles medidos en continuo. Superior) valores máximos, mínimos y medios durante de concentración de COVt en aulas comparado con la concentración exterior. Inferior) Evolución típica diaria de la concentración de COVt interior del aula. (Reproducido de (Lizana et al., 2020)).

Tabla 5.10. Resultados de los ensayos pasivos: COV

Centro	Aula	Unidad	benzene	trichloroethylene	toluene	tetrachloroethylene	ethylbenzene	m- + p-xylene	styrene	o-xylene	alpha pinene	1,4-dichlorobenzene
E1	1	µg/m³	1,1	<0.1	4,3	0,1	0,8	2,5	0,7	0,6	0,8	<0.1
	2	µg/m³	1,2	<0.1	6,7	0,1	3,1	9,0	0,9	2,2	0,8	<0.1
E2	1	µg/m³	1,3	<0.1	5,2	0,2	0,6	1,9	0,8	0,6	0,8	<0.1
	2	µg/m³	1,2	<0.1	9,4	0,1	0,7	2,0	0,6	0,6	0,3	<0.1
E3	1	µg/m³	1,5	<0.1	20,0	0,1	0,9	1,5	2,5	0,5	<0.1	0,1
	2	µg/m³	1,5	<0.1	16,4	0,1	0,7	1,2	1,5	0,5	<0.1	<0.1
E4	1	µg/m³	1,3	<0.1	4,0	0,2	0,3	0,8	0,6	0,3	0,3	<0.1
	2	µg/m³	1,4	<0.1	3,4	0,7	0,4	1,0	0,6	0,4	0,5	<0.1
E5	1	µg/m³	1,8	<0.1	9,2	0,1	0,9	1,6	1,7	0,6	<0.1	0,1
	2	µg/m³	1,3	<0.1	3,9	0,1	0,9	1,7	2,4	0,5	0,3	0,1
E6	1	µg/m³	1,3	<0.1	3,4	0,2	0,5	1,7	0,7	0,6	<0.1	<0.1
	2	µg/m³	1,3	<0.1	5,6	0,1	0,5	1,5	1,5	0,5	0,3	<0.1
E7	1	µg/m³	1,2	<0.1	5,0	0,3	0,6	1,7	0,6	0,6	<0.1	<0.1
	2	µg/m³	1,1	<0.1	8,4	0,2	0,6	2,1	0,5	0,7	0,3	<0.1
E8	1	µg/m³	1,5	<0.1	3,5	0,8	0,9	3,8	0,5	1,8	<0.1	<0.1
	2	µg/m³	1,5	<0.1	3,0	1,2	0,8	3,4	0,7	1,6	<0.1	<0.1
limit.		µg/m³	<1,7	<20	<250	<250	<850	<500	<30	<500	<200	<150

Tabla 5.11. Resultados de los ensayos pasivos: Aldehidos

Centro	Aula	Unidad	formaldehído	acetaldehído	acrolein	propanal	butanal	benzaldehído	isopentanal	pentanal	hexanal
E1	1	µg/m³	12,9	5,6	< 0.1	2,7	< 0.6	0,4	0,9	2,4	12,5
	2	µg/m³	21,0	5,6	< 0.1	1,9	< 0.6	0,5	0,9	2,5	13,8
E2	1	µg/m³	16,5	6,2	< 0.1	2,0	< 0.6	0,7	1,0	3,0	15,7
	2	µg/m³	8,3	5,1	< 0.1	1,9	< 0.6	0,4	0,9	1,8	9,0
E3	1	µg/m³	7,3	3,7	< 0.1	1,6	< 0.6	0,4	0,5	1,7	7,3
	2	µg/m³	5,6	3,3	< 0.1	1,6	< 0.6	0,3	0,7	1,5	6,3
E4	1	µg/m³	17,1	5,3	< 0.1	1,5	< 0.6	0,7	1,0	1,9	12,3
	2	µg/m³	12,6	4,5	< 0.1	1,9	< 0.6	< 0.1	0,8	2,6	15,3
E5	1	µg/m³	6,3	3,4	< 0.1	1,7	< 0.6	0,3	0,6	1,4	7,2
	2	µg/m³	8,6	4,2	< 0.1	1,9	< 0.6	0,5	0,7	1,8	9,9
E6	1	µg/m³	9,3	4,9	< 0.1	2,2	< 0.6	0,3	0,7	2,0	9,1
	2	µg/m³	11,1	5,0	< 0.1	2,2	< 0.6	0,5	0,7	2,2	12,1
E7	1	µg/m³	6,9	3,6	< 0.1	1,9	< 0.6	0,4	0,6	1,5	7,5
	2	µg/m³	7,6	3,7	< 0.1	1,9	< 0.6	0,3	0,7	1,6	8,8
E8	1	µg/m³	6,2	3,8	< 0.1	1,7	< 0.6	0,3	0,8	1,5	5,5
	2	µg/m³	9,2	4,0	< 0.1	1,7	< 0.6	0,5	0,7	1,5	7,5
límite		µg/m³	<50	<100	<0,8	no límite	<650	<20	no límite	<80	<900

**B. MP.** Los tamaños de partículas se evaluaron en 10 canales para diferentes rangos de tamaño de partícula. Los valores acumulados durante los periodos de medida para interior y exterior, se exponen en la Tabla 5.12 para partículas PM 10 y PM 2,5. En la Fig.5.15. se representan los valores acumulados medidos en el interior de las aulas ensayadas durante el periodo de muestra.



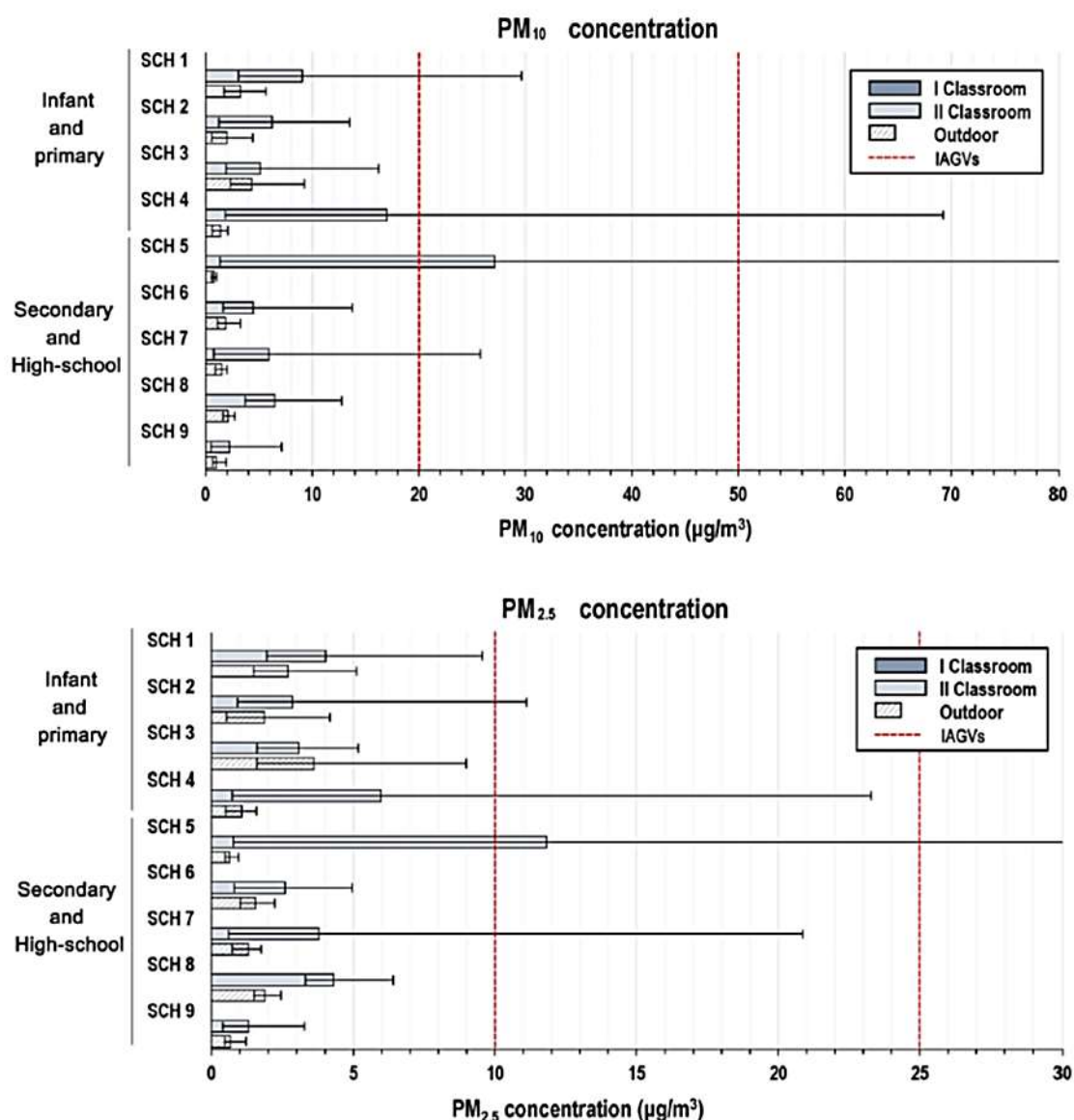


Fig.5.15. Valores de concentración de MP máximo, mínimo y medio, medido en el interior y el exterior: Superior) valores para PM<sub>10</sub>; Inferior) valores para PM<sub>2.5</sub>. Datos publicados en (Lizana et al., 2020)

En la Fig.5.15 se comparan los niveles de partículas obtenidos en el interior y en el exterior con los recomendados por las guías y publicaciones de referencia, comprobándose niveles inferiores en todos los casos.

Tabla 5.12. Medidas interiores y exteriores de MP (valores acumulados)

Dato	Unidad	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
PM <sub>10</sub>	µg/m <sup>3</sup>	9,0	6,2	5,1	17,0	27,1	4,4	5,9	6,5	2,2
Ext PM <sub>10</sub>	µg/m <sup>3</sup>	3,2	2,0	4,3	1,4	0,7	1,9	1,5	2,1	1,0
PM <sub>2.5</sub>	µg/m <sup>3</sup>	4,0	2,8	3,1	6,0	11,8	2,6	3,8	4,3	1,3
Ext PM <sub>2.5</sub>	µg/m <sup>3</sup>	2,7	1,9	3,6	1,1	0,6	1,5	1,3	1,9	0,7

**C. CO<sub>2</sub> como nivel indicador.** Los niveles de CO<sub>2</sub> se miden conjuntamente con los valores de temperatura y humedad a lo largo del periodo de ensayo. También se toman datos de la apertura de las ventanas para ventilación a lo largo de la jornada y del nivel de ocupación del aula. Los resultados se recogen en las Tablas 5.14 y 5.15.

**Tabla 5.13.** Resultados de concentración de CO<sub>2</sub> máxima, mínima y valor promedio en las aulas analizadas y condiciones de apertura de ventanas y protecciones solares y ocupación. (fuente: elaboración propia)

CENTRO	AULA	día	promedio	Máximo	Mínimo	Apertura ventanas y lamas	Nº ocupantes
E1	Aula 1	1	1324,45	3099	613	Según hora	Variable
		2	1715,52	<b>3284</b>	572	Según hora	Variable
	Aula 2	1	1302,55	2316	711	Según hora	Variable
		2	1164,33	1889	711	Según hora	Variable
E2	Aula 1	1	1799,60	2476	622	Según hora	Variable
		2	1185,65	2171	531	Según hora	Variable
	Aula 2	1	1376,35	2832	492	Según hora	Variable
		2	1592,31	2360	512	Según hora	Variable
E3	Aula 1	1	969,04	1299	622	Según hora	Variable
		2	1149,17	1923	571	Según hora	Variable
	Aula 2	1	1168,60	1838	600	Según hora	Variable
		2	1249,37	1922	568	Según hora	Variable
E4	Aula 1	1	1740,24	2372	1057	Según hora	Variable
		2	1567,85	2396	457	Según hora	Variable
	Aula 2	1	1166,64	1983	<b>506</b>	Según hora	Variable
		2	1519,54	2307	516	Según hora	Variable
E5	Aula 1	1	1118,94	1882	530	Según hora	Variable
		2	1315,25	2512	<b>405</b>	Según hora	Variable
	Aula 2	1	1326,53	1983	605	Según hora	Variable
		2	1323,51	2181	444	Según hora	Variable
E6	Aula 1	1	1702,48	3904	574	Según hora	Variable
		2	1131,16	2059	478	Según hora	Variable
	Aula 2	1	1996,63	3278	495	Según hora	Variable
		2	1781,32	3594	485	Según hora	Variable
E7	Aula 1	1	1047,10	1749	438	Según hora	Variable
		2	2782,64	<b>4042</b>	503	Según hora	Variable
	Aula 2	1	1575,65	2697	612	Según hora	Variable
		2	1115,01	2030	456	Según hora	Variable
E8	Aula 1	1	673,85	984	545	Según hora	Variable
		2	1393,28	2410	516	Según hora	Variable
	Aula 2	1	668,00	891	567	Según hora	Variable
		2	1599,69	2574	497	Según hora	Variable
E9	Aula 1	1	1248,73	3181	445	Según hora	Variable
		2	1828,10	3910	500	Según hora	Variable
	Aula 2	1	980,52	1708	425	Según hora	Variable
		2	2227,00	5366	442	Según hora	Variable

**Tabla 5.14.** Medidas exteriores de CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad (valor promedio). (fuente: elaboración propia)

Inicio jornada (9:00 h infantil y primaria / 8:00 secundaria h)									
Dato/Centro	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
CO <sub>2</sub> (ppm)	536	474	480	460	447	461	469	<b>427</b>	479
Temperatura (°C)	10,7	10,88	14,71	8,3	10,7	11,68	2,37	13,87	10,15
RH (%)	93,2	79,34	70,70	69,08	52,23	91,18	80,87	67,86	57,37
Final jornada (14:00 h infantil y primaria / 15:00 secundaria h)									
CO <sub>2</sub> (ppm)	436	432	464	463	450	448	439	417	417
Temperatura (°C)	22,17	18,4	22,85	17,47	15,94	21,06	24,64	27,7	22
RH (%)	35,44	37,43	39,03	31,98	73,75	53,33	41,78	27,98	20

### 1.2.3 Análisis y discusión

**A. COV.** El nivel de referencia que se adopta para los COVt es de 600 µg/m<sup>3</sup> para el valor promedio de las medidas durante la ocupación (Legislación portuguesa (Decreto-Lei n.º 78, 2006; Decreto-Lei n.º 79, 2006; Portaria n.º 353-A,

2013) Tabla 5.2). En la gráfica de la Fig.5.14 se representa también el valor dado por el BB101 para promedios de 8 horas. Los valores representados son promedios para la ocupación total evaluada de 2 días. En la gráfica superior de la Fig.5.14 se representan los valores máximos, mínimos y promedio medidos para cada centro comparando los valores interiores y los exteriores.

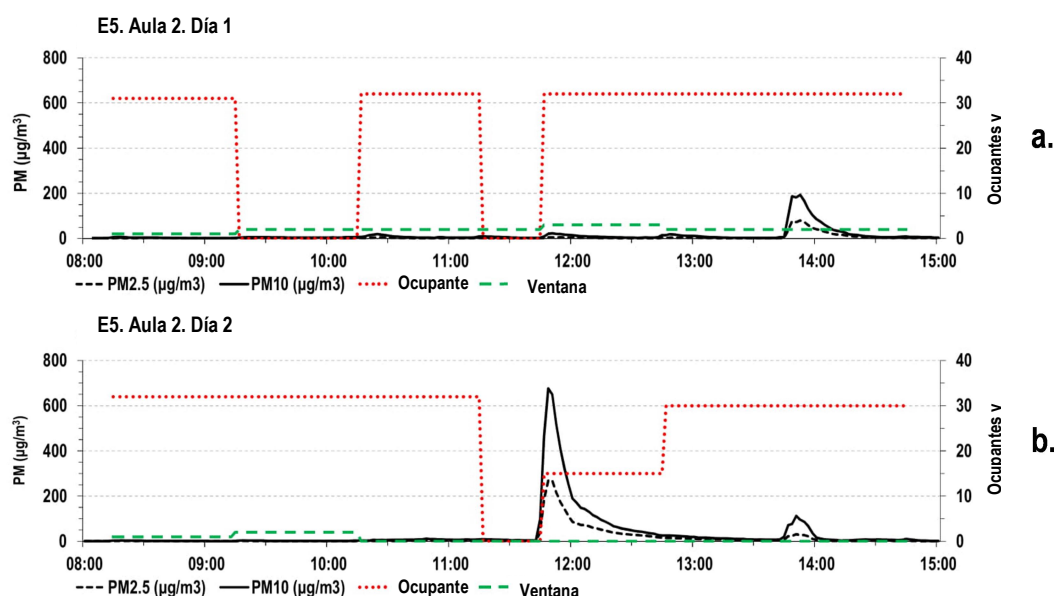
Se observa cómo los valores exteriores presentan diferencias de unas localizaciones a otras, lo cual puede estar relacionado con que la zona que sea de mayor densidad urbana o que puedan estar presentes otro tipo de actividades contaminantes. En cualquier caso, todos los resultados muestran valores medios de COVt en el entorno escolar por debajo de los niveles de referencia y por tanto sin riesgo.

En cuanto a las medidas interiores, la mayoría de las concentraciones son similares en todas las aulas, salvo alguna localización específica (E9) que presenta el mayor valor promedio durante la ocupación de  $452,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , con un valor máximo de  $1210,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este valor se relaciona con las fuentes de contaminación exteriores, dado que el promedio medido exterior también es el más alto, con  $306,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esto puede ir asociado a actividades industriales cercanas al centro escolar. Incluso en este caso, las medidas no superan el límite relativo al periodo de ocupación de  $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En relación a la evolución diaria de las medidas en continuo (en la Fig.5.14 inferior se representa la oscilación típica en un día lectivo), se observa cómo la concentración se encuentra vinculada a la ocupación, mostrándose valores estables antes de las 9:00 horas que comienzan a incrementarse a partir de esa hora, volviendo a descender a partir de las 14:00, con un pico descendente en mitad de la jornada, reflejo de la desocupación del aula durante el recreo (12:00 a 12:30).

En cualquier caso, en el resumen de los valores de las medidas pasivas (Tablas 5.10 y 5.11), en las que se identifican los contaminantes específicos, se observa cómo todas son inferiores a los niveles de referencia recomendados. En las Tablas se muestran los resultados de las muestras válidas. Solo se identifican algunos valores más altos de la media de las medidas obtenidas para benceno, tolueno, etilbenceno, m+pxileno y oxileno, pero siempre por debajo de los límites de referencia.

**B. MP.** Todos los niveles se encuentran por debajo de los recomendados por la OMS (entre  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) respectivamente en un valor promedio en 24 horas (Fig.5.15 y Tabla 5.12). Sólo en el edificio E5 se han observado niveles algo mayores, pero siempre por debajo de los límites recomendados. La relación entre el nivel de partículas interiores, la ocupación y la apertura de las ventanas en el edificio E5 se representa en la Fig.5.16.



**Fig.5.16.** Evolución del nivel interior de partículas (PM 10 y PM 2,5) en el edificio analizado E5: a. día 1; b. día 2. (fuente: elaboración propia)



Los valores máximos en el día 1 se obtienen con una ocupación máxima con 32 estudiantes y las ventanas abiertas. Los valores máximos para las medidas en el día 2 se obtuvieron con 16 estudiantes y las ventanas cerradas. Los niveles al aire libre son los más bajos de todos los edificios analizados ( $0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM10 y  $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM2,5) (Tabla 5.12). Por lo tanto, los valores máximos de partículas están relacionados con la ocupación y la actividad de los estudiantes en el aula, cuando las partículas de polvo se suspenden en el aire debido al movimiento. Los resultados muestran que los niveles interiores medidos son superiores a los exteriores. Esto es debido a las fuentes internas polvo, tiza, el propio usuario...etc. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Rufo et al. (Rufo et al., 2016) en Portugal, donde aplicando las recomendaciones del proyecto SINPHONIE (Eduardo, n.d.) obtuvieron mejoras en las concentraciones de PM2,5 y PM10 en interiores sin diferencias significativas con respecto a las concentraciones de MP en exteriores. Así mismo, los resultados coinciden con la OMS (WHO Regional Office for Europe, 2015), según la cual la concentración de MP suele ser superior en los interiores que en los exteriores. Con estos datos y desde el enfoque de los niveles de partículas, visto que los del interior son superiores a los exteriores por la propia actividad del usuario, para realizar la ventilación del espacio no sería necesaria la filtración de aire entrante, dado que los niveles exteriores son adecuados e inferiores a los del interior..

Los resultados de otros estudios en países europeos en relación a la CAI en escuelas, se muestran en la Fig.5.17.

Pollutant	Albania	Belarus	Bosnia and Herzegovina	Hungary	Italy	Kazakhstan	Serbia	Slovakia	Tajikistan	Ukraine
PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	69	28	102	56	82	65	81	80	91	33
Formaldehyde ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	5.6	7.5	7.1	2.4	33.1	10.4	1.7	8.7	12.9	11.5
Benzene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	4.1	2.0	6.3	2.2	2.0	6.3	5.9	4.8	7.4	2.5
Toluene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	15.5	6.2	27.6	4.6	5.0	18.1	21.9	29.5	17.4	4.9
Ethylbenzene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1.2	0.9	1.6	1.6	1.8	1.6	1.6	1.4	1.5	0.8
Xylenes ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	5.0	5.9	7.7	7.0	7.1	9.1	8.0	5.1	7.0	4.3

Fig.5.17. Valores de promedio de contaminantes medidos en escuelas en Europa. Datos de la OMS. Reproducido de (WHO Regional Office for Europe, 2015)

Los datos de la Fig.5.17 se comparan con los resultados obtenidos en la campaña de medidas y se representan en la Tabla 5.15

Tabla 5.15. Comparación de los valores medidos de contaminantes con los publicados por la OMS para otros colegios analizados en Europa. (fuente: elaboración propia)

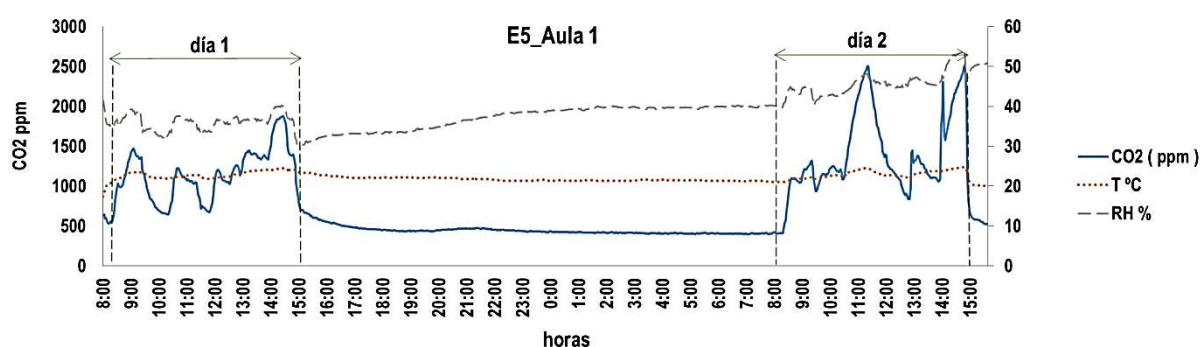
Contaminante	Valor campaña medidas		Valor OMS (WHO Regional Office for Europe, 2015)	
	min	max	min	max
PM10	2,2	27,1	28	102
Formaldehído	6,2	21	2,4	33,1
Benceno	1,1	1,8	2	7,4
Tolueno	3	20	4,6	29,5
Etilbenceno	0,3	3,1 <sup>(1)</sup>	0,8	1,6
Xileno	0,3	2,2	4,3	9,1

(1) Valor medido sólo en el aula 2 del centro escolar 1, estando el resto de medidas entre 0,3 y 0,9

En la Tabla 5.15 se comparan los resultados de la campaña de medidas con los de la OMS en otros países (Fig.5.17). Se observa cómo los valores acumulados de PM10 medido en interiores oscilan entre  $2,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (E9) y  $27,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (E5) en la campaña de medidas, comprobándose que son inferiores a los medidos en otras escuelas europeas, que oscilan entre los 28 y  $102 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Para el resto de valores, todos son inferiores a los que recoge la OMS en ejemplos en otros países europeos, salvo el etilbenceno, para el que se han obtenido valores superiores en 1 de las 18 aulas ensayadas, estando el resto de medidas entre 0,3 y  $0,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En cualquier caso, el valor se encuentra muy por debajo del nivel de referencia ( $850 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

**C. CO<sub>2</sub>.** Los niveles exteriores (Tabla 5.14) oscilan entre los 427 ppm y los 536 ppm en las medidas a primera hora de la mañana. Estos no varían especialmente con respecto a los que se toman al final del periodo de monitorización, por lo que puede decirse que el nivel exterior de CO<sub>2</sub> es prácticamente constante. Con respecto a la humedad relativa (HR) hay mayor variabilidad, desde el 50% a valores por encima del 90%, siendo la tendencia a valores superiores de HR a primeras horas con respecto a la medida de final de jornada. En cuanto a la temperatura, los valores son del entorno de los 10°C a primera hora (entre 8,3°C y 14,7°C) y sobre los 20°C al final de la jornada (entre 18,4°C y 24,67°C), lo cual hace que se haga uso de la calefacción a primeras horas de la mañana en la mayor parte de los casos).

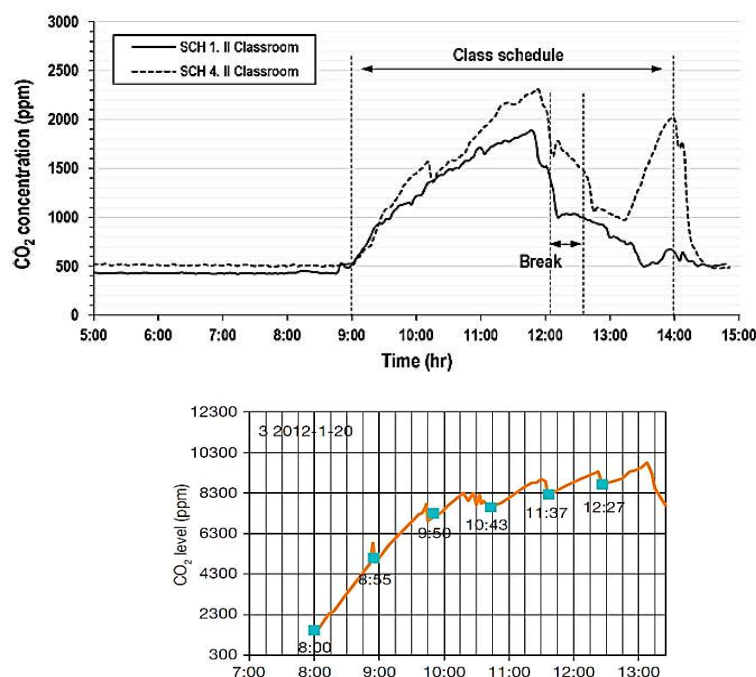
Los niveles interiores medidos en los centros de educación infantil y primaria (E1 a E4) oscilan entre las 500 y 3284 ppm. En los centros de educación secundaria (E5 a E9) están entre las 405 y las 4042 ppm. Se observa cómo los valores mínimos (que suelen coincidir con la primera hora de la mañana) están en el entorno de los valores exteriores (Tablas 5.13 y 5.14), mientras que el resto de los valores son variables en función de las condiciones de ocupación. En cuanto a la HR y la temperatura del aire, se obtienen valores similares para todos los edificios, estando entre el 30% y el 60% la HR y la temperatura entre 20°C-25°C. La evolución típica de las concentraciones de CO<sub>2</sub> y su relación con los valores interiores de temperatura y humedad de se muestran en la Fig.5.18.



**Fig.5.18.** Evolución típica de los niveles de CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad en las aulas durante el periodo de ocupación (fuente: elaboración propia)

En la Fig.5.18 se observa cómo los valores de concentración de CO<sub>2</sub> y de HR varían a lo largo de la jornada. Ambos sufren fluctuaciones, que presentan cierto paralelismo, lo cual está relacionado con la emisión de CO<sub>2</sub> y humedad por parte de los ocupantes en el proceso metabólico. El valor de temperatura interior, sin embargo, se presenta relativamente constante, debido a la utilización de la calefacción a primeras horas de la mañana. El descenso de la concentración de CO<sub>2</sub> se produce por dos causas, bien por la desocupación del aula, o el descenso del nivel de ocupantes, bien por la apertura de ventanas para ventilación (ya que los centros que disponen de una instalación de ventilación mecánica no la ponen en uso), o bien por la combinación de ambas.

Los resultados obtenidos, como cabía esperar, son bastante diferentes a los que se presentan en otros estudios de investigación en clima más frío, con edificios con elevados niveles de hermeticidad y cuyos ocupantes no tienen costumbre de ventilar las estancias ni las aulas de manera controlada. Como ejemplo de esto, Clements-Crome sugería que el nivel usual de CO<sub>2</sub> en las escuelas inglesas era de 4000 ppm (Clements-Croome, Awbi, Bako-Biro, Kochhar, & Williams, 2008). Así mismo, la OMS en su publicación "Schools survey report" (WHO Regional Office for Europe, 2015) considera que la evolución del nivel de concentración de CO<sub>2</sub> representado en la Fig.5.19 (Inferior) es representativo de una mala CAI, donde el nivel de CO<sub>2</sub> se presenta con ligeras oscilaciones, pero siempre ascendente hasta alcanzar una concentración del entorno de las 9000 ppm. La evolución típica de la concentración de CO<sub>2</sub> en las aulas analizadas en este estudio se muestra en la Fig.5.19 (Superior).

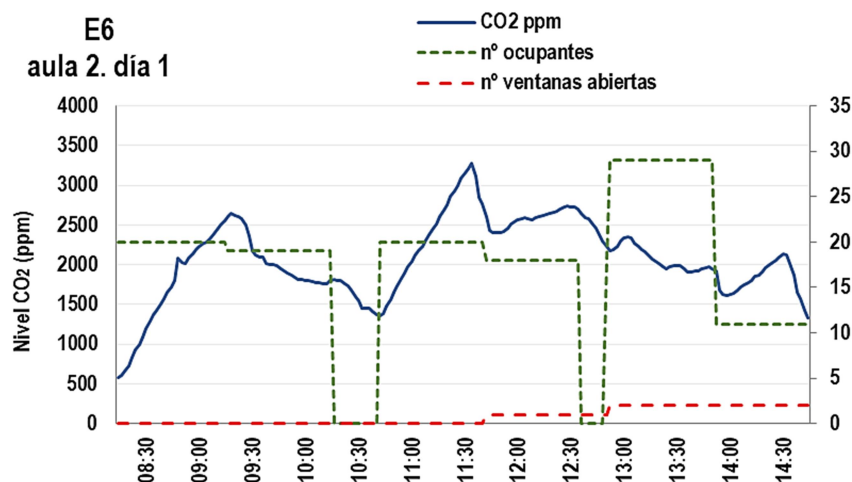


**Fig.5.19.** Evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> característica. Superior) Ejemplo de oscilación de CO<sub>2</sub> en un día lectivo de un aula en una escuela en Andalucía según la campaña de medidas (reproducido de (Lizana et al., 2020);

Inferior) Representación de la concentración de CO<sub>2</sub> en un aula con mala CAI según la OMS (reproducido de (WHO Regional Office for Europe, 2015))

Tal como se aprecia en la Fig.5.19 (superior), el patrón de evolución de las concentraciones de CO<sub>2</sub> no coincide con el previsto en publicaciones que hacen referencia a estudios en países fríos (Fig.5.19 inferior) (Clements-Croome et al., 2008). En los resultados obtenidos en la campaña experimental se observan picos de CO<sub>2</sub> alrededor de 2000-3000 ppm, pero estos son escasos y no son continuos, relacionándose con episodios puntuales, que no se mantienen durante largos periodos de tiempo. Por lo tanto, de los datos experimentales obtenidos, no puede afirmarse que haya coincidencias con los resultados de otros estudios como los de Reino Unido (4000 ppm) (Clements-Croome et al., 2008), confirmándose el interés de la realización de estudios específicos como éste.

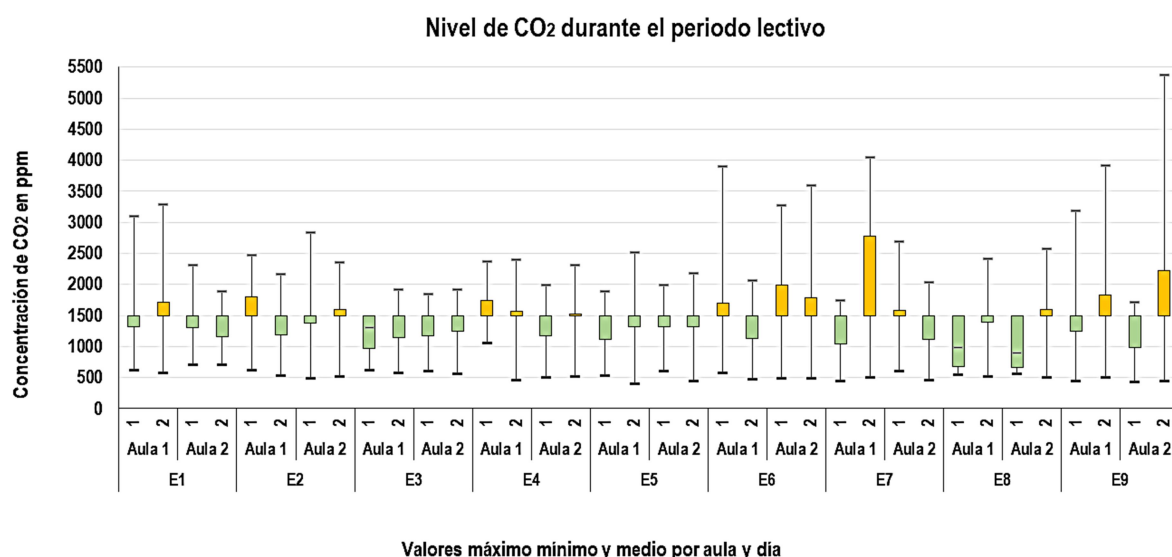
Analizando los niveles de CO<sub>2</sub> es posible identificar el grado de ocupación del aula. Así, en las gráficas, la desocupación del aula en la hora del recreo hace que las concentraciones desciendan por debajo de las 1000 ppm en la mayoría de los casos. Para evaluar cómo influye la práctica de VN en los niveles de concentración de CO<sub>2</sub>, se representan en la siguiente gráfica (Fig.5.20) la apertura de elementos practicables en fachadas y paramentos interiores junto con el nivel de CO<sub>2</sub> y el grado de ocupación del aula (eje "y" a la derecha). En general se observa que la pendiente de la línea es mayor en la disminución de la concentración por apertura de ventanas que en el aumento por la ocupación, por lo que es posible observar la acción rápida del efecto de renovación del aire cuando se ventila. Los periodos de ocupación y no ocupación se incluyen en las gráficas con la finalidad de analizar la evolución de las concentraciones en relación con el uso del espacio y el funcionamiento del edificio.



**Fig.5.20.** Relación de la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> con la ocupación y la apertura de ventanas (fuente propia)

En la Fig.5.20 se aprecia claramente cómo el nivel de CO<sub>2</sub> comienza a ascender desde primera hora de la mañana, con una ocupación de 20 alumnos en este caso y todas las ventanas cerradas, superándose en este caso las 2500 ppm a la hora y cuarto del inicio de las clases. Sobre las 10:15 la totalidad de los alumnos abandonan el aula y el nivel desciende hasta las 1500 ppm, manteniéndose las ventanas cerradas. Al volverse a ocupar el aula tras el primer descansando, el nivel vuelve a ascender aumentando esta vez hasta las 3200 ppm aproximadamente. Esto es debido a que, al no haber realizado ninguna tarea de aireación en el descanso, el nivel de inicio del siguiente bloque de materias es muy elevado (1500 ppm). Este efecto se observa claramente a partir de las 11:30, hora en la que se comienzan a abrir progresivamente las ventanas, donde puede observarse el descenso notable de la concentración de CO<sub>2</sub> aun incrementándose la ocupación del aula, que llega a tener casi un 50% más de alumnos (29/20).

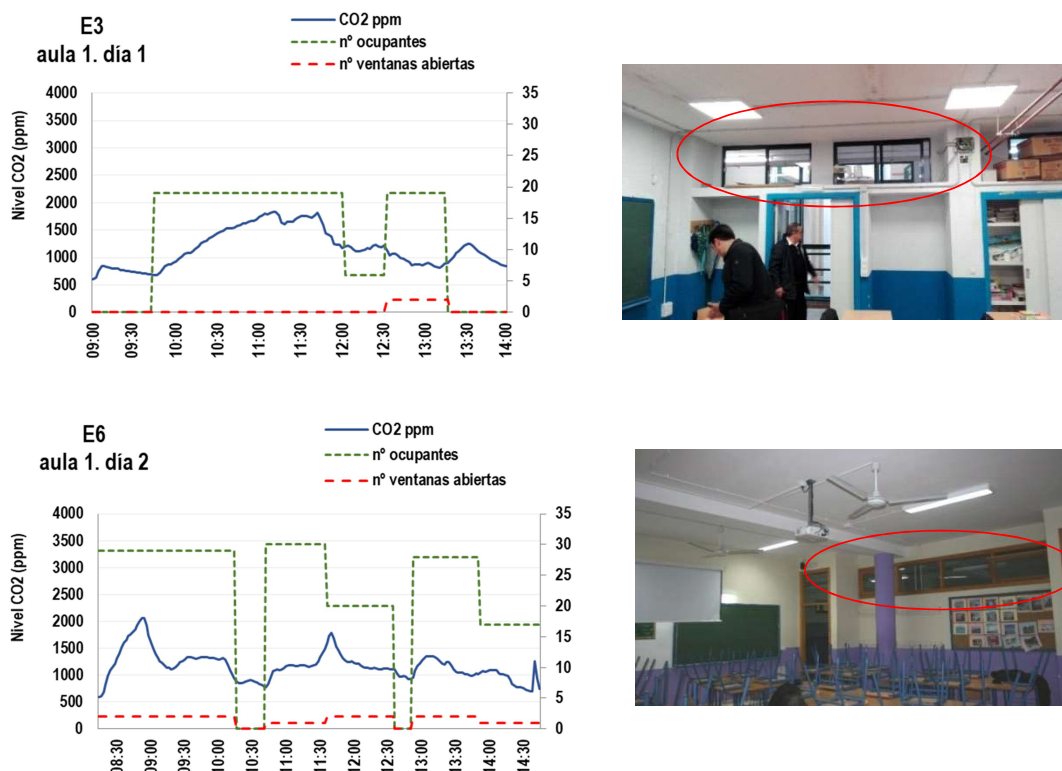
Al ser el CO<sub>2</sub> reconocido como un indicador de la CAI, la mayoría de las normas y reglamentos se basan en este parámetro para determinar la CAI. Así, los valores límite están directamente relacionados con las emisiones de bioefluentes humanos, en términos de niveles máximos de concentración de CO<sub>2</sub> (Awbi, 1998) o niveles medios medidos durante el periodo de ocupación del espacio (Department for Education UK, 2016). Los ejemplos de desviación de la concentración media de CO<sub>2</sub> se analizan en la Fig.5.21, donde se representa la concentración media diaria de CO<sub>2</sub> a lo largo del periodo diario de ocupación en las aulas.



**Fig.5.21.** Niveles de concentración de CO<sub>2</sub> durante el periodo lectivo para cada una de las aulas y días de ensayos. Valores representados máximos, mínimos y promedios en relación al promedio de referencia de 1500 ppm (fuente propia)

Del total de 36 días de la campaña experimental, hubo 22 días (61,11%) en los que los niveles medios de CO<sub>2</sub> durante las lecciones se ubicaron en todo el periodo por debajo del límite promedio de 1500 ppm.

Se han detectado casos en los que los niveles de CO<sub>2</sub> no son tan altos como podría esperarse con una alta ocupación (Fig.5.22).



**Fig.5.22.** Ventanas al pasillo abiertas durante la realización de las medidas. Izda.) Aula 1 del edificio E3 el día 1 de ensayo.; Dcha.) Aula 1 del edificio E6 el día 2 de ensayo (fuente: elaboración propia).

En la Fig.5.22 se observa cómo los niveles de CO<sub>2</sub> son bajos y sensiblemente constantes durante la jornada en relación a la ocupación del aula (E3 superior 20 alumnos y E6 inferior media 28 alumnos). En ambos casos, esto se debe a la acción del mecanismo de ventilación cruzada y/o apertura de ventanas al pasillo interior durante el ensayo (Fig.5.22 derecha, superior e inferior), lo que permite una ventilación cruzada efectiva, que mejora los resultados de la ventilación a una cara, que es la que se produce cuando sólo se abren las ventanas de fachada.

## 1.2.4 Conclusiones del apartado

Del análisis del conjunto de datos obtenidos, puede concluirse, en relación a la CAE y la CAI de los edificios escolares analizados lo siguiente:

### A. En relación a los contaminantes químicos

- En el caso de las medidas en continuo se observa cómo el mayor nivel de concentración está relacionado con la ocupación. Todos los niveles exteriores se encuentran siempre por debajo de las medidas de niveles interiores.
- Se observa cómo todos los contaminantes analizados con medidas pasivas están por debajo de los niveles de referencia, quedando patente que las fuentes emisoras de éstos son prácticamente inexistentes en este tipo de edificios. Por tanto, puede decirse que no existen fuentes emisoras o que están controladas en el interior de los edificios.
- Según lo anterior, el nivel de CO<sub>2</sub> podrá ser un indicador de la CAI, pero se basa en los parámetros de contaminantes de otro tipo de usos, por lo que se hace necesario realizar una propuesta específica para este uso, para lo que se pueden utilizar los datos obtenidos en los ensayos de contaminantes junto con los de CO<sub>2</sub> y realizar una nueva calibración.

### B. En relación a las partículas

- Los niveles de MP en interiores se encuentran por debajo de los límites de referencia.
- Se observan niveles interiores superiores a los medidos en el exterior, lo que lleva a pensar que se producen en el interior por la propia actividad de los ocupantes (polvo, tiza, etc...).

- Se confirma un nivel adecuado de partículas en el exterior en los edificios escolares analizados, por lo que con estos niveles de partículas entrantes, no se requiere filtración de aire al ser los interiores de valor superior. Las estrategias que habrá que llevar a cabo para su eliminación deberán ser limitar las fuentes emisoras y/ la renovación del aire interior con aire exterior.

### **C. En relación a los niveles de CO<sub>2</sub> y condiciones de ventilación**

- En general, no se identifican prácticas de ventilación de apertura de ventanas realizadas expresamente de manera pautada para renovación del aire interior.
- No obstante, la mayoría de los niveles de CO<sub>2</sub>, están dentro de los rangos identificados como representativos de una adecuada CAI. Del total de las 36 unidades de medida interior de la campaña experimental, hubo 22 días (61,11%) en los que los niveles medios de CO<sub>2</sub> durante las lecciones se ubicaron en todo el período por debajo del límite promedio de 1500 ppm. Así mismo, todos los datos medidos, incluso los valores mayores de concentraciones medidos (4000 ppm) son muy inferiores a los valores que la OMS considera una mala CAI en las aulas.
- La ocupación es variable y por tanto la concentración de CO<sub>2</sub>. Si se realizan estrategias de ventilación en base a este parámetro, los niveles deben ser variables.
- Con prácticas de ventilación a una cara se produce la renovación del aire interior de manera eficaz, tanto si las aberturas están practicadas en los paramentos de fachada como en los paramentos interiores al pasillo. Con soluciones de ventilación cruzada, los resultados se mejoran.



### 1.3 Eficacia de los sistemas de ventilación para garantizar la CAI

En este apartado se estudia la efectividad de los SVN. Para ello, se comparan dos aulas de dos centros escolares ventilados de manera diferente (uno de ellos dispone de VN y el otro de VM). Se estudia el funcionamiento del SVN en comparación con el SVM mediante el análisis de los niveles interiores de CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad.

Los resultados obtenidos en los ensayos en relación al funcionamiento comparativo de ambos tipos de sistema, así como la efectividad del SVN, se encuentran publicados en la revista Energy con el título “Natural ventilation systems in 21st-century for near zero energy school buildings” (Gil-Baez et al., 2017). Energy. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.188>.

#### 1.3.1. Metodología

La metodología para la realización del estudio se llevó a cabo a través de las siguientes tareas: i) Identificación de los parámetros a analizar y niveles de referencia; ii) Diseño del ensayo (incluyendo la selección de los equipos de medida, los medios de ensayo y los centros y las aulas a ensayar); iii) Toma de medidas interiores y exteriores. Los equipos de medida y herramientas informáticas para el procesamiento de datos empleados se describieron en el Capítulo 3 (Metodología).

- i. **Parámetros a analizar y niveles de referencia.** En ambos casos se analiza la concentración de CO<sub>2</sub> en el aula a lo largo del día lectivo. Los límites utilizados como niveles de referencia para el análisis son los recomendados por la norma inglesa para ventilación en edificios escolares (BB101 (Department for Education and skills, 2006) (EFA, 2016)), así como el recogido en la normativa española para ventilación mecánica (RITE) (IDA 2), según se recogen en la Tabla 5.16.

**Tabla 5.16.** Niveles de CO<sub>2</sub> como indicador de la CAI

CO <sub>2</sub>	Unidad	Límite	Tiempo de exposición y observación
SVN	ppm	<1500	Media de concentración durante el periodo de ocupación (Department for Education and skills, 2006; EFA, 2016)
		<1000	Nivel de concentración durante la ocupación (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013)
SVM	ppm	<1000	Media de concentración durante el periodo de ocupación (EFA, 2016)
		<1000	Nivel de concentración durante la ocupación (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013)

En la Tabla 5.16 se han recogido los niveles de referencia en base a los cuales se analizan los resultados obtenidos de concentración de CO<sub>2</sub> en los ensayos “in situ”. El valor de 1000 ppm se refleja tanto en el caso del SVM como en el del SVN, por ser el que determina la normativa española (RITE) para una CAI IDA 2.

**Diseño del ensayo.** Se realiza una prueba experimental específica en dos edificios escolares existentes. Un edificio (Edificio A) tiene un SVN básico en cada una de sus aulas, mientras que el otro edificio (Edificio B) tiene un SVM centralizado para el conjunto de espacios docentes. Las pruebas se realizaron durante un día escolar típico en marzo, en el que los sistemas de calefacción permanecen operativos. Se toman datos de CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad interiores, así como los mismos valores (CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad) en el exterior.

**Selección de los equipos de medida y los medios de ensayo.** Se utilizaron sensores de medición y registradores de datos (Hoboware) para medir la temperatura, la HR y la concentración de CO<sub>2</sub>, tanto en el interior como en el exterior de ambos edificios. En la Tabla 5.17, se muestran las características del equipo de medición.

**Tabla 5.17.** Características de los equipos de medida

Equipo interior		Equipo exterior
Composición del sistema	Data Logger HOB0 U12-013 con sensores incorporados Temperatura / humedad relativa	Data Logger HOB0 U23-001 con sensores incorporados temperatura/humedad relativa
	Sensor CO2 CWE HOB0 U12-012	Data Logger HOB0 U12-008 con canales exteriores para sensor de CO <sub>2</sub>
	24 V Fuente de alimentación sensor	Sensor CO2 CWE con protección a la intemperie conectado a HOB0 U12-008
		24 V Fuente alimentación sensor
		Protección intemperie de la Fuente de alimentación y del sensor

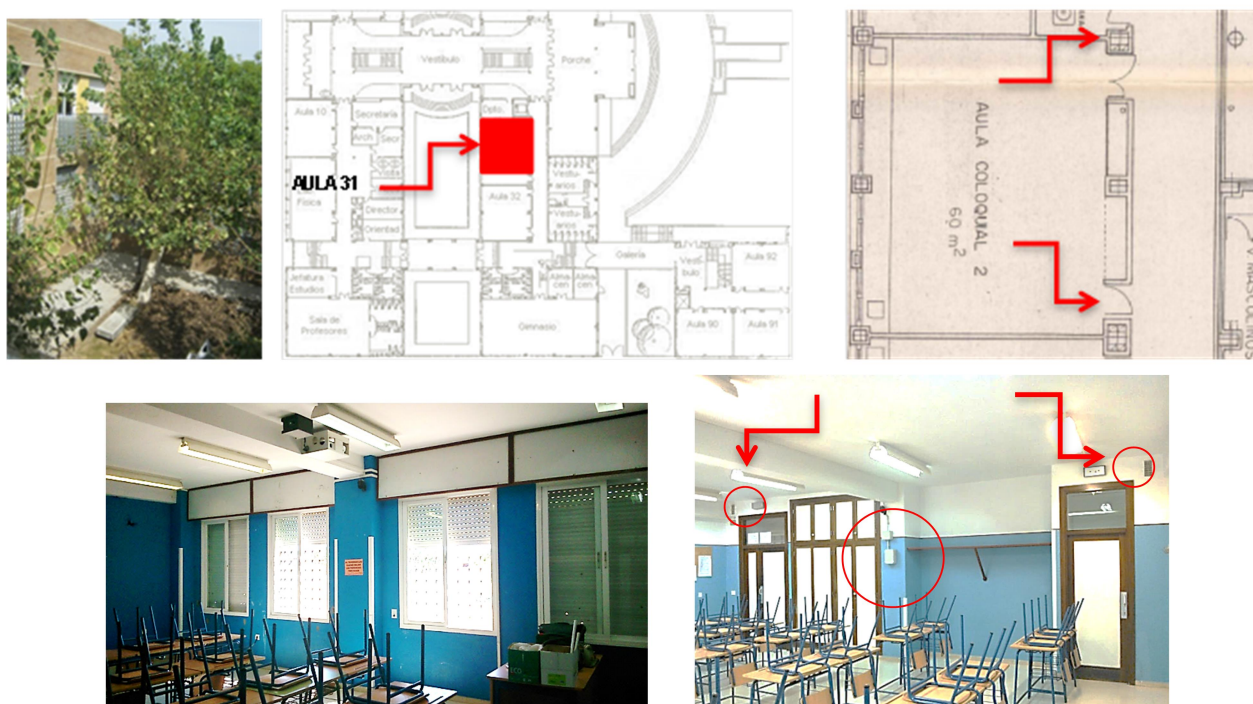
**Selección de los centros y las aulas a ensayar.** Se seleccionan dos centros educativos de educación secundaria, del mismo nivel educativo y similares características, dimensionales del aula y condiciones de ocupación. Las soluciones técnicas y materiales constructivos de los edificios corresponden al momento de su construcción, siendo el Edificio A, con VN, anterior al CTE (Ministerio de vivienda, 2006) y el Edificio B, con VM, posterior al CTE.

**EDIFICIO A.** Es un edificio existente, con un SVN que funciona de manera independiente en cada aula. En la Tabla 5.18 se recogen las principales características del edificio y del aula de ensayo.

**Tabla 5.18.** Edificio A. Principales características del edificio existente con VN y aula de ensayo

EDIFICIO A	Edificio existente con VN
Descripción	Planta baja + primera
Año de construcción	1988
Sistema de calefacción	Radiadores de agua caliente y caldera de gasoil
Sistema de ventilación	SVN con dos shunts en cada aula
Aula donde se desarrolla la campaña	Aula 31, planta baja, orientación sur hacia un patio interior
Dimensiones del aula	60 m <sup>2</sup> superficie, 3 m altura, 180 m <sup>3</sup> volumen
Ocupación media	23 estudiantes de 12 años y 1 profesor
Edad de los estudiantes	Educación secundaria. Estudiantes entre 12-16 años

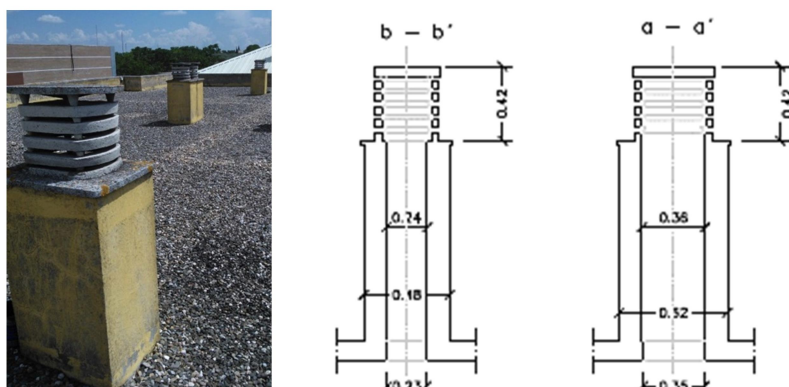
En la Fig.5.23, se presentan la distribución del edificio A y la ubicación del aula 31 donde se desarrollaron las pruebas. Los criterios de selección de esta aula fueron: i) la existencia de un sistema de VN (solo disponible en edificios escolares construidos antes de 1990); ii) orientación sur; iii) y ubicación en la planta baja que da a un patio interior. Estos se determinaron como los criterios más desfavorables para que el sistema SVN mantenga las condiciones de confort. En las Fig.5.24 se muestran los elementos de ventilación del aula 31 (ventanas, shunts y registros interiores).



**Fig.5.23.** Edificio A. Superior izda.) imagen del patio; Superior centro) ubicación aula 31 (fuente: planos archivo APAE); Superior dcha.) ubicación de chimeneas en planta (fuente: planos archivo APAE); Inferior izda.) ventanas al exterior; Inferior dcha.) rejillas de ventilación conectadas con el shunt de cubierta y data logger. (Fuente: elaboración propia)

El aula dispone de 4 ventanas de 2 hojas (Fig.5.23 Inferior izda.). Se abre 1 hoja de cada ventana, manteniéndose la persiana bajada al 50% aproximadamente, lo cual supone 2,3 m<sup>2</sup>, siendo esto el 23,6 % de la superficie acristalada. (Las características de la admisión son: nº ventanas=4; Tamaño del hueco=1,55x1,57m; Superficie total acristalada 4x1,55x1,57=9,734 m<sup>2</sup>; Tamaño de apertura neta =0,735x ,57 m; Superficie aproximada de apertura máxima sin tener en cuenta persianas 4 ventanas x 0,735 m (ancho) x 1,57 m (alto) = 4,6158 m<sup>2</sup>.)

En la Fig.5.24 se representan las chimeneas de extracción en cubierta con aireadores estáticos (Fig.5.24. izda.) así como sus dimensiones (Fig.5.24. dcha.)



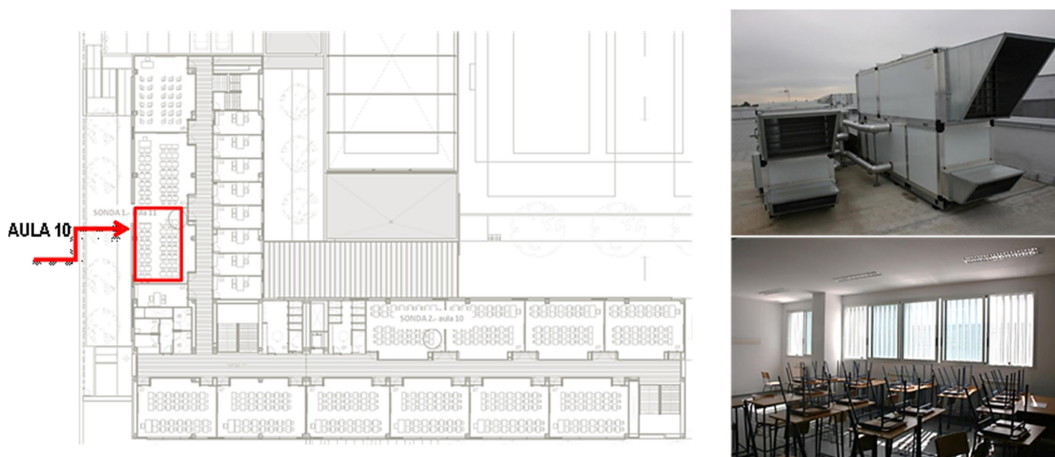
**Fig.5.24.** Edificio A. Izda.) Chimeneas del shunt en cubierta. Dcha.) sección de la chimenea (Fuente: elaboración propia)

**EDIFICIO B.** Edificio existente con un SVM centralizado para la ventilación de los distintos espacios lectivos. En la Tabla 9.21 se recogen las principales características del edificio y del aula de ensayo.

**Tabla 5.19.** Edificio B. Principales características del edificio existente con VM y aula de ensayo

EDIFICIO B	Edificio existente con ventilación mecánica
Descripción	Planta baja + primera
Año de construcción	2014
Sistema de calefacción	Radiadores de agua caliente y caldera de gas natural
Sistema de ventilación	Sistema de ventilación mecánica
Aula donde se desarrolla la campaña	Aula 11, planta baja, orientación sur, expuesta al exterior.
Dimensiones del aula	60 m <sup>2</sup> superficie, 3 m altura, 180 m <sup>3</sup> volumen
Ocupación media	23 estudiantes de 12 años y 1 profesor
Edad de los estudiantes	Educación secundaria. Estudiantes entre 12-16 años

En la Fig.5.25, se presentan la distribución del Edificio B y la ubicación del aula 10 donde se desarrollaron las pruebas. Los criterios de selección fueron: i) condiciones similares a las seleccionadas para el edificio A para permitir una comparación fácil; ii) posición en un edificio escolar recientemente construido con un SVM.



**Fig.5.25.** Edificio B. Arriba) ubicación aula 11. Abajo) ventanas del aula (izquierda) y unidades de tratamiento de aire (derecha)

- ii. **Toma de datos.** En ambos casos se llevaron a cabo distintas acciones de ventilación del aula en estudio, utilizando los sistemas de ventilación existentes en cada uno de los edificios. Se organizó un esquema de encendido y apagado planificado de las instalaciones de calefacción y ventilación mecánica, así como un

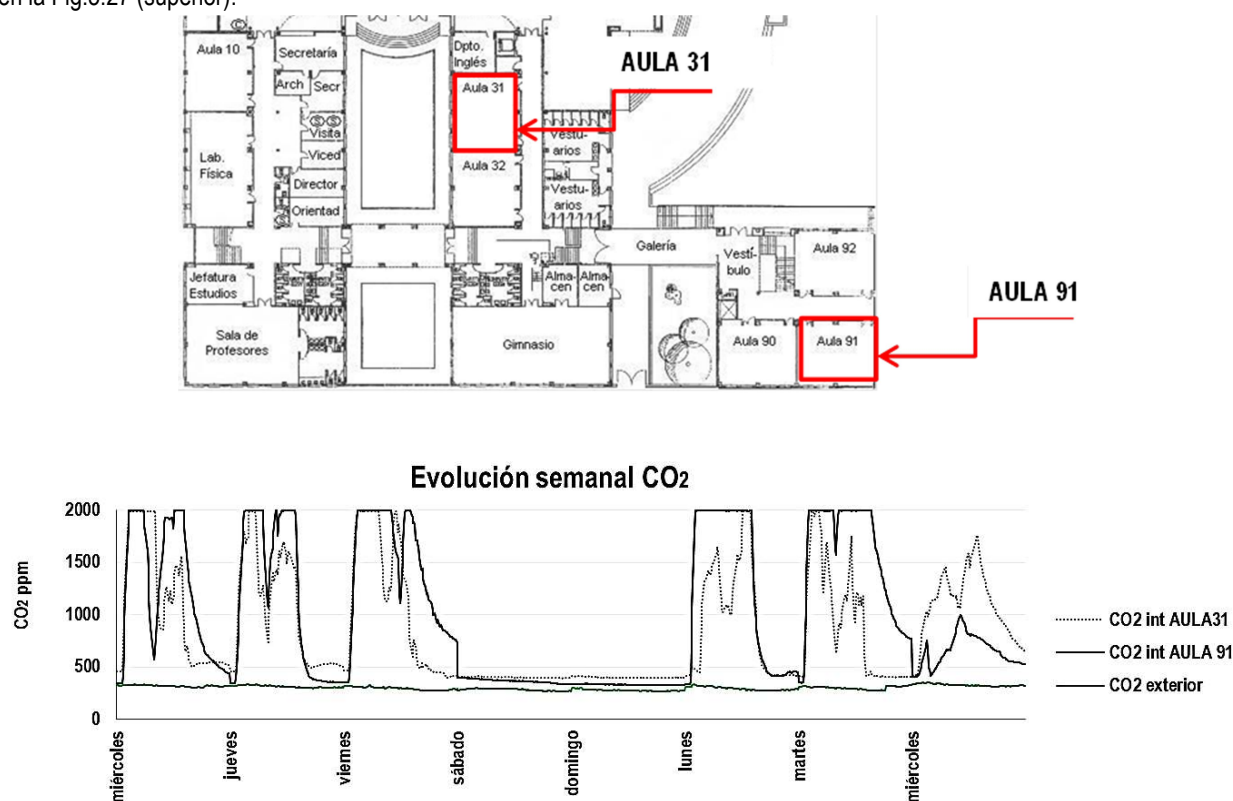
procedimiento establecido y registrado para abrir puertas y ventanas. Estas acciones programadas se supervisaron en todo momento por el investigador

**EDIFICIO A. funcionando con un SVN.** En el Edificio A (con VN), previamente se realiza un ensayo complementario, consistente en una prueba con bote de humo para verificar el funcionamiento correcto de la chimenea de VN en el aula 31 (Fig.5.26), obteniéndose resultados positivos.



**Fig.5.26.** Prueba de humo realizada para comprobar la correcta operación de la chimenea. (fuente: elaboración propia)

En la Fig.5.26 se muestra una imagen del ensayo realizado para comprobar el correcto funcionamiento de las chimeneas de VN en el aula de ensayo. Además, se monitorizó durante una semana completa el nivel de concentración de CO<sub>2</sub> de este aula en comparación con otra (aula 91), construida en una ampliación posterior del edificio y sin SVN en la misma, obteniéndose los resultados de la Fig.5.27 (inferior). El aula 91 presenta similares características constructivas y de ocupación que el aula 31, con orientación este y fachada exterior, según se refleja en la Fig.5.27 (superior).



**Fig.5.27.** Superior) Resultados del registro de la evolución semanal de los niveles de CO<sub>2</sub> interior de las aulas 31 y 91. (fuente: elaboración propia). Inferior) Identificación de las aulas de ensayo (fuente: archivo APAE)



En la Fig.5.27 (inferior) se observa cómo en el aula 31 (con VN), la concentración de CO<sub>2</sub> en ppm, es en general inferior a la alcanzada en el aula 91 (sin VN). Se observa cómo el nivel de concentración es variable, en función de la ocupación y las prácticas de aireación llevadas a cabo por los usuarios sin una pauta preestablecida. Para tener un conocimiento más detallado del grado de aireación y su eficacia, se lleva a cabo el ensayo que se detalla en la Tabla 5.20 y la Fig.5.28, en el que se observa la evolución del nivel de CO<sub>2</sub>, bajo unas pautas concretas y controladas de ventilación del aula.

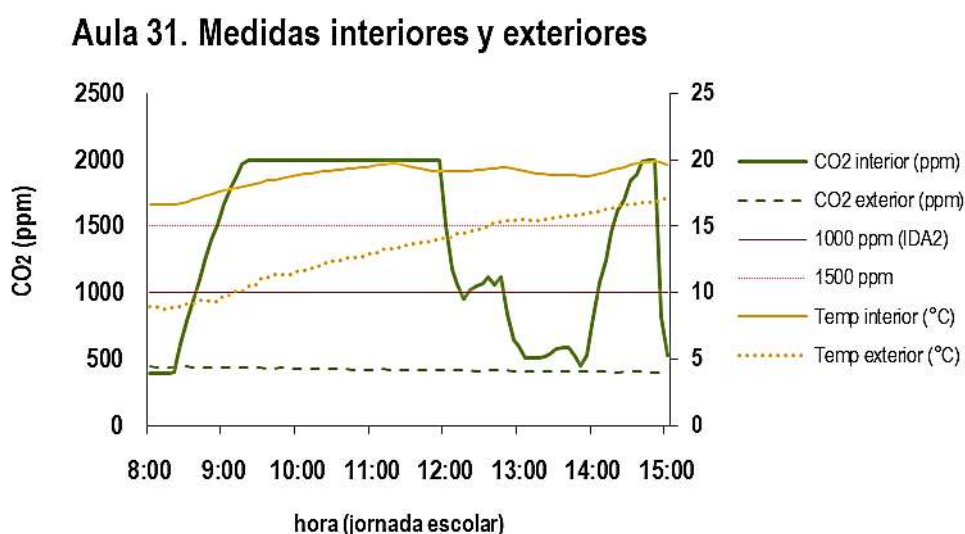
### 1.3.2. Resultados

En las Tablas 5.20 y 5.21 se presentan las acciones de ocupación y ventilación programadas para el análisis en el Edificio A (con VN), y en el Edificio B (con VM). En las Figs.5.28 y 5.29, se representa la evolución de los principales parámetros interiores medidos a lo largo del día escolar en el aula (con VN y VM respectivamente). También se muestran valores de temperaturas y concentraciones de CO<sub>2</sub> en exteriores. Además, se señala el nivel máximo de CO<sub>2</sub> recomendado para una CAI tipo IDA 2, en base a lo recogido en la literatura, (1000 ppm=IDA 2 según la regulación española para VM (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013)).

**Resultados EDIFICIO A. Funcionando con un SVN.** Los resultados obtenidos en el ensayo desarrollado en el aula del Edificio A con SVN se representan en la Tabla 5.20 y la gráfica de la Fig.5.28. En la Tabla 5.20, se presentan las acciones de ocupación y ventilación programadas, para analizar su efecto en las condiciones interiores en el Edificio A (con SVN). En la Fig.5.28 se reflejan los resultados obtenidos con los equipos de medida representados en forma de gráfica donde se identifica la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> interior, así como los valores límites identificados de 1000 ppm (IDA2) y 1500 ppm (BB101).

**Tabla 5.20.** Edificio A (VN). Datos del ensayo

Hora	Ocupación	Acción experimental
8:15	Calefacción encendida	Ventanas cerradas
8:15-9:15	1ª hora de clase	Ventanas cerradas
9:15-10:15	2ª hora de clase	Ventanas cerradas
10:15	Se apaga la calefacción	Ventanas cerradas
10:15-11:15	3ª hora de clase	Ventanas cerradas
11:15-11:45	Recreo	Ventanas cerradas
11:45-12:45	4ª hora de clase	<b>Ventanas abiertas</b>
12:45-13:45	5ª hora de clase	<b>Ventanas abiertas</b>
13:45-14:45	6ª hora de clase	Ventanas cerradas
		Fin del día escolar

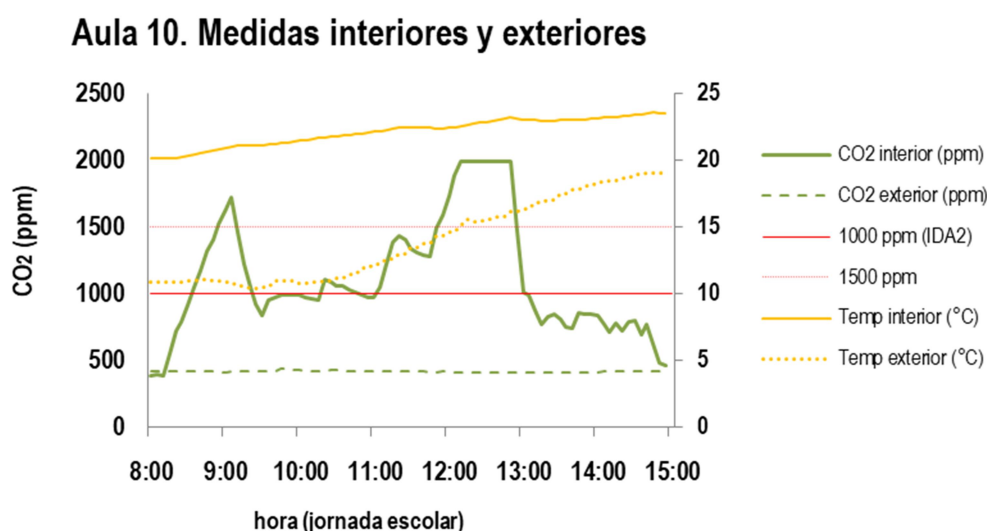


**Fig.5.28.** Resultados del ensayo Edificio A (SVN) (fuente: elaboración propia)

**Resultados EDIFICIO B. con un SVM.** Los resultados obtenidos en el ensayo desarrollado en el aula del Edificio B con SVM se representan en la Tabla 5.21 y la gráfica de la Fig.5.29. En la Tabla 5.21, se presentan las acciones de ocupación y ventilación programadas, para el análisis de su efecto en las condiciones interiores en el Edificio B (con SVM). En la Fig.5.29 se reflejan los resultados obtenidos con los equipos de medida, representados en forma de gráfica, donde se identifica la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> interior, así como los valores límites identificados de 1000 ppm (IDA2) y 1500 ppm (BB101).

**Tabla 5.21.** Edificio B (VM). Datos del ensayo

Hora	Ocupación	Acción experimental
8:15	Calefacción encendida	Ventanas cerradas
8:15-9:15	1ª hora de clase	Ventanas cerradas
9:15-10:15	2ª hora de clase	Ventanas cerradas. Puertas abiertas. Encendido del SVM
10:15-11:15	3ª hora de clase	MVS funcionando. Ventanas cerradas
11:15-11:45	Recreo	Apagado del SVM y de la calefacción. Ventanas cerradas y puertas abiertas
11:45-12:45	4ª hora de clase	Ventanas y puertas cerradas
12:45-13:45	5ª hora de clase	<b>Ventanas abiertas</b> y puertas cerradas
13:45-14:45	6ª hora de clase	<b>Ventanas abiertas</b> y puertas cerradas
		Fin del día escolar



**Fig.5.29.** Resultados del ensayo Edificio B (SVM)

### 1.3.3. Análisis y discusión

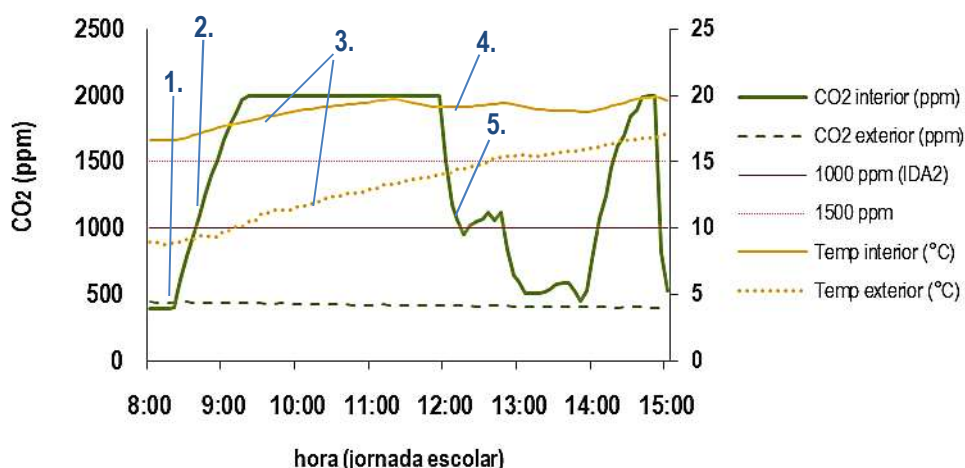
**EDIFICIO A. SVN.** En la Fig.5.28 se representan gráficamente los resultados obtenidos en el ensayo y se analizan en detalle en la Fig.5.30 superior.) según los siguientes puntos señalados en el gráfico de la Fig. 5.30 (superior):

1. En el punto señalado con 1. (Fig.5.30 superior) Se observa cómo el nivel de CO<sub>2</sub> interior es igual al nivel exterior al comienzo del día, cuando el aula está todavía vacía.
2. En el punto señalado con 2 (Fig.5.30 superior), este nivel de CO<sub>2</sub> aumenta progresivamente con la ocupación, superando las 1000 ppm 30 minutos después del inicio de las clases, ya que todas las puertas y ventanas están cerradas, no hay admisión de aire, siendo las infiltraciones insuficientes para producir el efecto chimenea. La concentración máxima de CO<sub>2</sub> que los sensores pueden medir es de 2000 ppm, y estos sensores se saturaron cuando las concentraciones pasaron este nivel. Al ser superior al límite considerado de 1000 ppm no se requirieron más datos de concentración de CO<sub>2</sub> para identificar la necesidad de ventilación.
3. El punto 3. (Fig.5.30 superior), señala cómo se aprecia en cuanto a la temperatura, que la interior aumenta de 17°C a 20°C durante el día y la temperatura exterior de 8,5°C a 17°C.



- Por otro lado, el punto 4. (Fig.5.30 superior) señala cómo la temperatura interior continúa aumentando sin que funcione ningún sistema de calefacción, debido a las ganancias de calor internas y a la inercia térmica de la edificación.
- Finalmente, con el punto 5 (Fig.5.30 superior), se señala en la línea de la gráfica que representa el nivel interior de CO<sub>2</sub> cómo mientras las ventanas están abiertas, el nivel de CO<sub>2</sub> disminuye rápidamente muy por debajo del nivel máximo de concentración de CO<sub>2</sub>. Este nivel es casi igual a la concentración ambiental externa de CO<sub>2</sub> a las 14:00. La temperatura interior permanece prácticamente sin cambios, aunque las ventanas estén abiertas y el sistema de calefacción se haya apagado. Las pérdidas de calor con la ventilación natural son menos significativas que el calor generado por los ocupantes y la radiación solar.

### Aula 31. Medidas interiores y exteriores



### Aula 10. Medidas interiores y exteriores

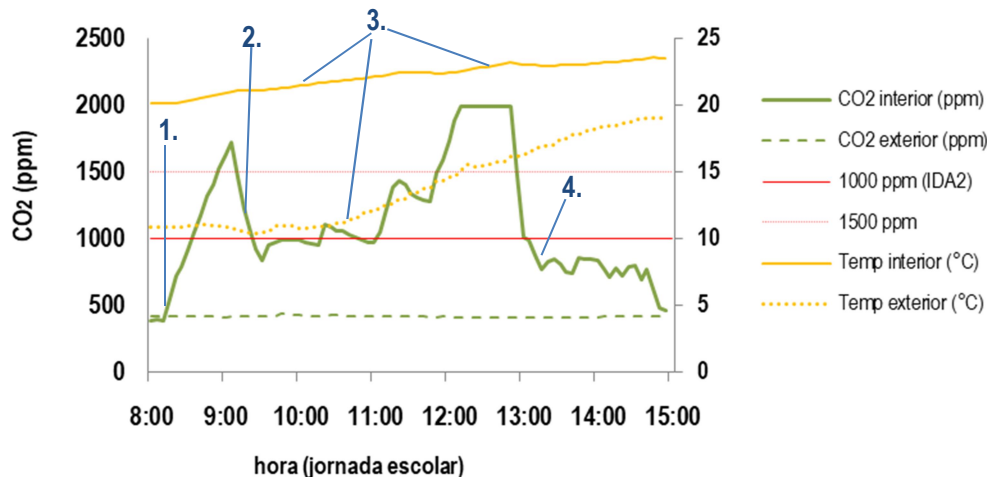


Fig.5.30. Análisis de resultados. Superior) Edificio A; Inferior) Edificio B

**EDIFICIO B. SVM.** En la Fig.5.29 se representan gráficamente los resultados obtenidos en el ensayo y se analizan en detalle en la Fig. 5.30 inferior) según los siguientes puntos:

- En el punto 1 de la gráfica de la Fig.5.30 (inferior), se señala cómo la evolución de CO<sub>2</sub> es similar a la de los análisis anteriores. El nivel de CO<sub>2</sub> en el interior es igual al nivel de CO<sub>2</sub> en el exterior al comienzo del día cuando el aula todavía está vacía.
- El punto 2. (Fig.5.30 inferior) identifica cómo el nivel de CO<sub>2</sub>, que aumenta cuando el aula está ocupada, cuando se enciende el SVM, el CO<sub>2</sub> disminuye a 1000 ppm, dentro del nivel de diseño. El incremento del nivel

de CO<sub>2</sub> también es equivalente, con una línea de pendiente similar. Sin embargo, la pendiente de la línea descendente difiere ligeramente en el caso de SVN, probablemente debido a la diferencia en el flujo de suministro de aire, ya que, en el SVM el aire fluye a través de conductos y rejillas de admisión, mientras que en el caso de SVN el aire fluye al interior a través de las ventanas abiertas.

3. Con el punto 3. Se señala la temperatura interior, que aumenta de 20°C a 23,5°C a lo largo del día, mientras que la temperatura exterior aumenta de 11°C a 19°C. La temperatura interior continúa aumentando sin que el sistema de calefacción funcione debido a las ganancias de calor internas. En este caso la temperatura interior también permanece prácticamente inalterable aunque se esté introduciendo aire a menor temperatura, debido a las ganancias internas y a la inercia térmica interior.
4. Finalmente con el punto 4. (Fig.5.30 inferior), se señala cómo al abrir las puertas pero no las ventanas y con el aula sin ocupación (durante el recreo), el nivel de CO<sub>2</sub> disminuye, pero no tanto como si las ventanas estuvieran abiertas. Por otro lado, al abrir las ventanas, se logra una renovación rápida y efectiva del aire interior sin afectar la temperatura interior.

### 1.3.4. Conclusiones del apartado

Del análisis del conjunto de datos obtenidos en los ensayos realizados comparando ambos sistemas de ventilación en los Edificios A y B , se comprueba lo siguiente:

1. Se verifica la eficacia del SVN del Edificio A en la renovación del aire interior quedando la temperatura interior dentro de niveles aceptables. Se comprueba que con la apertura de las ventanas, se produce la ventilación cruzada que funciona conjuntamente con el efecto chimenea, facilitando la renovación del aire del interior del aula y descendiendo el nivel de CO<sub>2</sub> por debajo de las 1000 ppm en 5 minutos.
2. Se demuestra que las condiciones de confort con VN no se ven afectadas, a pesar de la introducción del aire del exterior (a 15°C), permaneciendo la temperatura interior prácticamente inalterable (en el entorno de los 20°C), mientras que se consigue el descenso del nivel de CO<sub>2</sub> por debajo de las 1000 ppm. Esto es debido a la inercia térmica de la edificación junto con las cargas internas, que hacen que la temperatura interior medida no sufra cambios mientras se renueva el aire.



## 2.- Diseño y dimensionado del SVN

### Resumen

En este apartado se describe el proceso de cálculo y los resultados obtenidos para el diseño de un SVN destinado a garantizar la CAI en el interior de los espacios de uso docente durante el periodo de su ocupación. Esta solución se desarrolla como solución alternativa a las instalaciones de ventilación mecánica que desarrollan las Instrucciones Técnicas del RITE (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013), en base a su artículo 14.2 b). El sistema estándar se diseña para cumplir con las exigencias técnicas que establece el RITE.

Se sigue la siguiente metodología:

1. **Modelo teórico:** se diseña un modelo teórico de cálculo, en base al análisis realizado en el Estado del Arte y a los resultados obtenidos en la primera parte del Plan Experimental, recogidos en el Capítulo 9.
2. **Cálculo:** se realizan los cálculos y comprobaciones que validan la viabilidad de uso y funcionamiento del modelo teórico del SVN.
3. **Definición de un sistema estándar:** se definen las condiciones del sistema estándar en base a criterios objetivos, para finalmente proceder al diseño de una solución estándar, basada en el modelo teórico, que se pueda implementar en un edificio escolar en construcción

Parte de los resultados recogidos en este apartado se encuentran publicados y han sido presentados en comunicaciones en congresos, según se relaciona a continuación:

- Presentación en “11th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems – SDEWES Conference,” en 2016 con el título “Natural Ventilation Systems in 21st century Zero Energy Buildings”. Sdewes Centre. <http://www.lisbon2016.sdewes.org/>
- Presentación en “Natural ventilation systems in Mediterranean schools. A prototype experience in Andalusia as an alternative to mechanical ventilation”. 38th AIVC - 6th TightVent & 4th venticool Conference, 2017 Ventilating healthy low-energy buildings. University Of Nottingham. International Network on Ventilation and Energy Performance (INIVE) on behalf of the Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC), TightVent Europe (the Building and Ductwork Airtightness Platform), and venticool (the international platform for ventilative cooling. Brunel University London. The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE). <http://www.aivc2017conference.org>
- Presentación en “Potencial de los sistemas de ventilación natural pasiva en la reducción del consumo eléctrico. Proyecto piloto en un colegio en Andalucía”. IV Congreso Edificios de Energía Casi Nula .Grupo Tecmared. Secretaría de Estado para la Sociedad de la Información y la Agenda Digital, SESIAD – Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital. <http://www.congreso-edificios-energia-casi-nula.es/>
- Publicación con el título “Natural ventilation systems in 21st-century for near zero energy school buildings” (Gil-Baez et al., 2017), en Energy. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.188>
- Publicación con el título “Natural Ventilation Systems in Mediterranean Schools. A prototype experience in Andalusia as an alternative to mechanical ventilation” (Gil-Báez, Barrios-Padura, Molina-Huelva, & Roldán-Vendrell, 2017). ISBN : 9782930471518
- Publicación con el título “Potencial de los sistemas de ventilación natural pasiva en la reducción del consumo eléctrico. Proyecto piloto en un colegio en Andalucía” (Congreso, Energ, & Nula, 2017). ISBN: 9781973163398

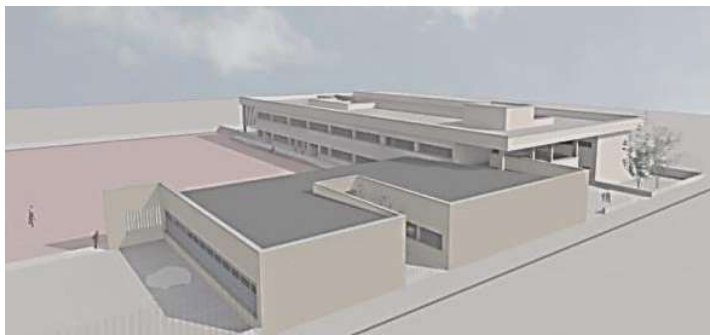
## 2.- Diseño y dimensionado del SVN

2.1	Modelo teórico .....	235
2.1.1	Consideraciones previas y bases de partida .....	235
2.1.2	Diseño del aula como unidad de uso y funcionamiento .....	236
2.1.3	Edificio modelo .....	240
2.2	Cálculo .....	242
2.2.1	Metodología .....	242
2.2.2	Resultados .....	242
2.2.3	Análisis y discusión .....	244
2.2.4	Conclusiones sobre el modelo teórico .....	245
2.3	Diseño del sistema .....	247
2.3.1	Descripción .....	247
2.3.2	Modelo final del sistema estándar para aulas .....	250
2.3.3	Condiciones generales que deben cumplirse para la utilización del sistema estándar .....	252

## 2.1 Modelo teórico

Se desarrolla un modelo teórico de cálculo sobre un edificio prototipo (Fig.5.31) en el que se diseña un SVN similar al monitorizado en la prueba experimental en el Edificio A, con VN (Capítulo 5, apartado 1), en la que se comprobó que un sistema con chimeneas y “shunts” de ventilación y admisión de aire en la fachada podía garantizar la renovación del aire interior.

Mediante el cálculo numérico se valida el funcionamiento del SVN en el edificio prototipo en cada zona sub-climática de Andalucía y se compara con el funcionamiento y consumo de energía un SVM diseñado conforme a las normativas técnicas españolas, que también se incluye en el modelo de cálculo. En base a los resultados que se obtienen del modelo teórico, se diseña un SVN “estándar” para implementar en las aulas de los centros educativos.



**Fig.5.31.** Imagen del edificio prototipo sobre el que se desarrolla el modelo teórico para el cálculo. (fuente: archivo APAE)

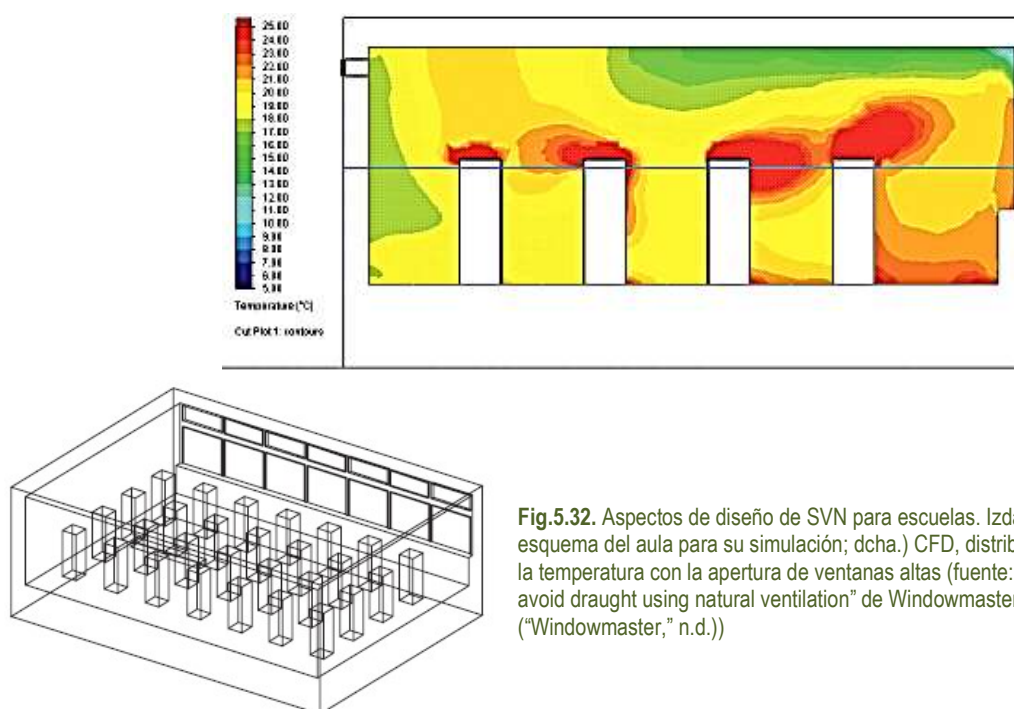
### 2.1.1 Consideraciones previas y bases de partida

El modelo para el cálculo incorpora un SVN, que se diseña teniendo en cuenta las consideraciones derivadas de la investigación expuestas en los capítulos anteriores, que se resumen a continuación:

1. Un edificio pasivo, que es aquél que, entre otras características, está ventilado naturalmente (Capítulo 1).
2. Los edificios ventilados naturalmente son edificios que si sólo tienen calefacción, funcionan en oscilación libre fuera de la temporada de invierno y que aplican principios de confort adaptativo (Capítulos 1 y 4).
3. Las pérdidas del sistema de calefacción por el funcionamiento de la VN, no son más que una carga adicional que hay que tener en cuenta en el cálculo (Capítulo 1).
4. La tasa de ventilación tendrá en cuenta la eliminación de los contaminantes del interior cuando se use la calefacción y podrá incrementarse en época de sobrecalentamiento interior para aplicar principios de refrigeración pasiva (Capítulo 1).
5. Con una estrategia de ventilación cruzada en combinación con el efecto chimenea se consigue una mayor eficacia del SVN con mejores resultados (Capítulo 1).
6. Con la admisión de aire a través de ventanas altas ubicadas cerca del techo se minimiza el riesgo de corrientes de aire en la zona ocupada (Capítulo 1).
7. El desarrollo de este sistema se encamina a cubrir una carencia existente en la normativa nacional actualmente vigente aplicada al uso no residencial. Se desarrolla en aplicación del artículo 14.2 b) del RITE. Las exigencias técnicas que deben cubrirse se identifican en los artículos 10 y 11 (Capítulos 1 y 4).
8. El CO<sub>2</sub> es un indicador de la CAI y del nivel interior de contaminantes, pero no es un contaminante en sí mismo. La OMS recomienda para edificios educativos una ventilación mínima de 4 l/s y persona. Considera niveles aceptables de concentración de CO<sub>2</sub> si el promedio alcanzado durante el periodo de ocupación del espacio está en el rango entre 1000 a 1500 ppm, cuando todas las fuentes de contaminación se encuentran controladas y recomienda también que la ventilación se haga coincidir con los intermedios de las lecciones (Capítulo 1).
9. A falta de valores de referencia en la normativa española, específicos para uso docente y ventilación natural, se pueden adoptar los valores del BB101 (Capítulo 1).
10. Las ventanas automáticas mejoran los resultados de la ventilación, al hacer su funcionamiento independiente del usuario ((Capítulo 1).
11. El aula es la unidad de uso en un edificio docente, de ocupación variable e intermitente (Capítulo 4).



Se han tenido también en consideración recomendaciones de las empresas especializadas en sistemas y soluciones de VN en edificios, con soluciones específicamente diseñadas para edificios de uso educativo. En la Fig.5.32 se refleja la propuesta de diseño de un SVN propuesto por Windowmaster ("Windowmaster," n.d.) (izda.) En la Fig.5.32. dcha., se muestran los resultados del estudio de este modelo de ventana ("Windowmaster," n.d.), según el cual, si se disponen las entradas de aire en fachada por encima de la zona ocupada, el aire frío entrante se mezcla con el interior cálido en la zona superior y se evitan las corrientes posibles corrientes de aire en la temporada fría.



**Fig.5.32.** Aspectos de diseño de SVN para escuelas. Izda.) esquema del aula para su simulación; dcha.) CFD, distribución de la temperatura con la apertura de ventanas altas (fuente: "How to avoid draught using natural ventilation" de Windowmaster ("Windowmaster," n.d.))

## 2.1.2 Diseño del aula como unidad de uso y funcionamiento

En el modelo de cálculo se caracteriza el aula como unidad de uso independiente, por ser el espacio lectivo principal y presentar una elevada densidad de ocupación, ocupación variable y uso intermitente. El sistema se diseña de manera independiente e individual para cada aula (unidad de uso). La estrategia de ventilación se basa en la utilización combinada de la ventilación cruzada y el efecto chimenea (stack), de manera que el flujo natural del aire se produce por la fuerza del viento y la presión causada por la diferencia de temperatura (Fig.5.33).



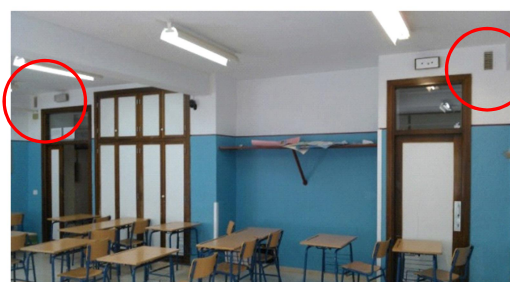
**Fig.5.33.** Esquema de funcionamiento ventilación cruzada+efecto stack. Izda.) Reproducido de BB101 (2006), dcha.) Reproducido de (CIBSE, 2005).

Existen numerosos ejemplos similares basados en los dos principios de funcionamiento, tanto fuera de España (Fig. 5.34) como en la arquitectura escolar andaluza (Fig.5.35 y 5.36).

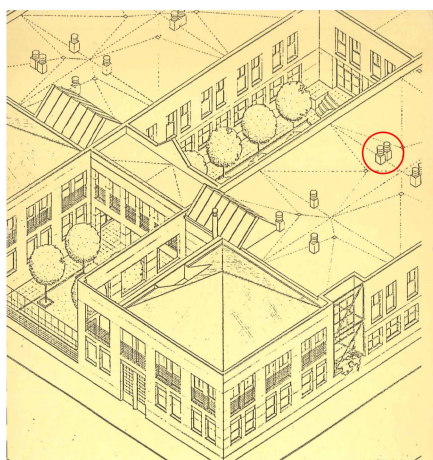


**Fig.5.34.** Imagen del diseño de las admisiones en fachada en un edificio existente. (fuente Windowmaster ("Windowmaster," n.d.))

El ejemplo de edificio escolar con un SVN con el mismo principio de funcionamiento (ventilación cruzada y efecto chimenea) de la arquitectura escolar andaluza, se estudió en el apartado anterior de este capítulo para comprobar la efectividad de funcionamiento del sistema de ventilación (Edificio A). Los elementos característicos del sistema se representan en las Figs.5.35 y 5.36.



**Fig.5.35.** Ventilación por efecto chimenea en el aula del Edificio A estudiado en el apartado anterior del capítulo 5: Izda.) Admisión apertura en el frente de fachada; dcha.) apertura de expulsión en el cerramiento opuesto al pasillo embocado hacia la chimenea conectada con la cubierta. (fuente: propia)

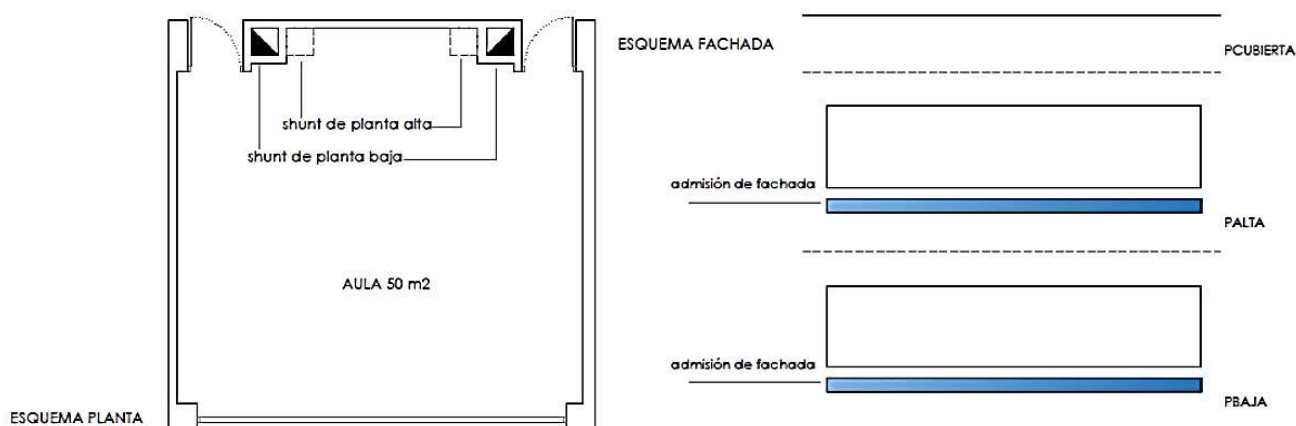


**Fig.5.36.** Organización del conjunto de la edificación del Edificio A estudiado en el apartado anterior del capítulo 5. Izda.) axonometría del conjunto (fuente: proyecto archivo APAE); dcha.)-imagen de las chimeneas en cubierta. (fuente: propia)

En las Figs.5.35 y 5.36 se muestran los elementos constituyentes del SVN en la unidad de uso (aula) en el Edificio A estudiado en el apartado anterior. El sistema es independiente en cada una de las aulas y todas tienen las salidas de expulsión de las chimeneas conectadas al exterior a través de la cubierta. La dimensión del aula y del edificio permite disponer dos chimeneas de expulsión por aula y organizar en la cubierta todas las salidas (Fig.5.36.izda.).

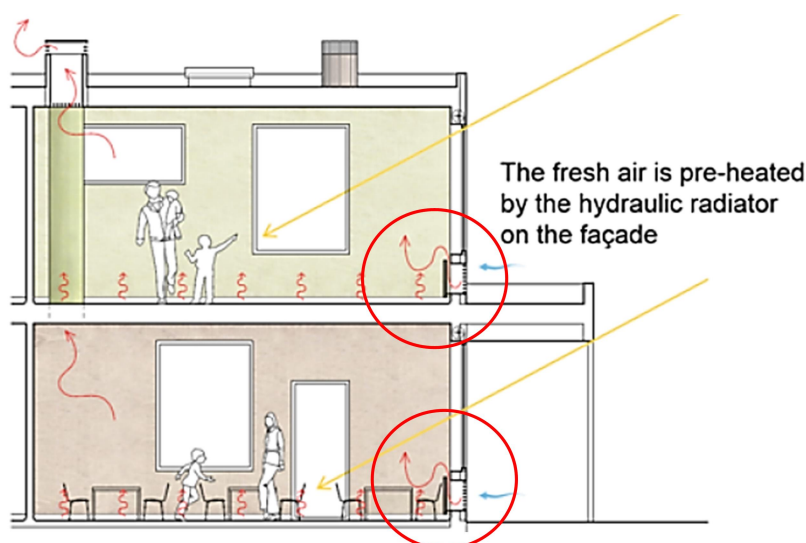
La admisión de aire se produce por fachada a través de las ventanas (Fig.5.35.izda.) (de apertura manual y hoja corredera). La expulsión de aire se realiza a través de las salidas de los "shunts" (dos por aula) ubicadas en el frente opuesto a la fachada (Fig.5.35.dcha), conectadas con las chimeneas de cubierta. Las chimeneas se rematan con un aireador estático (Fig.5.36 dcha.).

**Esquema de diseño del aula.** El esquema de diseño para el aula del modelo de cálculo se basa en el del Edificio A descrito anteriormente (Figs.5.35 y 5.36). Su diseño se representa en el esquema de la Fig.5.37.



**Fig.5.37.** Esquema del SVN en el aula. Izda) esquema en planta; dcha.) esquema en fachada. (fuente: elaboración propia)

Las admisiones se disponen en fachada (Fig.5.37 dcha.) y la expulsión del aire se realiza a través de los shunts dispuestos en la pared opuesta (Fig.5.37.izda.). El desarrollo de los conductos verticales hasta la cubierta es individual para cada aula (Fig.5.37.izda.). En el diseño de las admisiones se tiene en cuenta el confort térmico, con una disposición tal que se evitan las corrientes de aire molestas. El esquema permite minimizar el tamaño de las entradas de aire y reducir las pérdidas de calor y las corrientes de aire frío, que se introduce tras la ubicación del radiador. Este tipo de disposición se considera en la publicación "Ventilative Cooling Design Guide. Energy in Buildings and Communities Programme". 2018. (*Ventilative Cooling Design Guide Energy in Buildings and Communities Programme*, 2018), según se representa en la Fig.5.38.izda.



**Fig.5.38.** Diferentes ubicaciones de las admisiones en fachada: Superior) Ejemplo del caso i) rejillas a la altura de los radiadores. Reproducido de (*Ventilative Cooling Design Guide Energy in Buildings and Communities Programme*, 2018); Inferior) ejemplo del caso ii) ventanas en la zona superior del paramento. Reproducido de (CIBSETM57, 2015)

En la Fig.5.38 se representan dos posibles opciones de diseño en cuanto a la disposición de la aberturas en la fachada, ambas con la finalidad de evitar las corrientes de aire molestas: i) con rejillas a la altura de los radiadores para el atemperamiento del aire (Fig.5.38. izda) y ii) en la zona superior del paramento con otros elementos practicables que pueden ser ventanas (Fig.5.38 dcha.).

**Predimensionamiento de las aberturas.** Se utilizan diversos sistemas de predimensionamiento (cada sistema tiene sus propias herramientas y fórmulas de cálculo).

Estos resumidamente son:

- CIBSE AM10 (herramienta Calctool) (CIBSE, 2005)(CIBSE, n.d.)
- BB101 (herramienta Classvent) (Department for Education, 2016)
- ASHRAE (datos porcentuales) (ASHRAE, 2009)
- Métodos empíricos varios: Método I Florida Solar Energy Centre; Método ASHRAE: (2 opciones efecto viento y efecto temperatura); Método British Standard. (2 opciones ventilación cruzada y ventilación natural)

**Valores para el cálculo del volumen de renovación de aire de los espacios.** Para determinar el caudal de aire de renovación se adoptan los niveles recomendados por la norma inglesa para escuelas ventiladas naturalmente “Building Bulletin 101: Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools (2016)” y “Building Bulletin 101 Ventilation of School Buildings (2006)” (Department for Education and skills, 2006; EFA, 2016), ambos del Department for Education (UK Government). En cuanto al nivel de concentración de CO<sub>2</sub>, se utiliza el valor de la norma UNE EN-13779 (AENOR, 2005) para una CAI tipo IDA2, haciendo referencia a la parte superior del rango (600 ppm) y no al valor por defecto (según se vio en el Capítulo 4. (Fig.4.30). Dado que el nivel exterior de concentración de CO<sub>2</sub> se considera de 400 ppm (AENOR, 2005; Ministerio de vivienda, 2006), se obtiene como valor límite de referencia 1000 ppm (600 ppm+400 ppm).

Se estudian dos escenarios de cálculo:

**SVN.** Se programa el cálculo para obtener una renovación del aire de 8,4 litros/segundo y persona. Este valor se obtiene de aplicar el límite expuesto en el párrafo anterior (1000 ppm) al cálculo para la tasa de ventilación para la dilución de una emisión conocida según la UNE 13779 (AENOR, 2005) (fórmula representada en la Fig.5.39).

$$q_{v,SUP} = \frac{q_{m,E}}{c_{IDA} - c_{SUP}}$$

**Fig.5.39.** Tasa de ventilación para una emisión conocida s/ UNE 13779. Reproducido de (AENOR, 2005)

donde

$q_{v,SUP}$	es el caudal volumétrico del aire de impulsión en m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>
$q_{m,E}$	es el caudal másico de la emisión en el recinto en mg.s <sup>-1</sup>
$c_{IDA}$	es la concentración permitida en el recinto en mg.m <sup>-3</sup>
$c_{SUP}$	es la concentración en el aire de impulsión en mg.m <sup>-3</sup>

La tasa de ventilación para la disolución de una emisión conocida viene dada por la tasa de emisión y el nivel de concentración permitido en el recinto.  
Como norma el control de la fuente es preferible a la ventilación (AENOR, 2005) .

El contaminante conocido que se utiliza para el cálculo es el CO<sub>2</sub>, por ser el único compuesto que se ha comprobado que puede alcanzar niveles altos en el interior de las aulas (visto en el Capítulo 4). En el edificio en estudio, como en el resto de edificios de uso docente, los materiales utilizados son no emisivos y no contaminantes, por lo que la fuente principal de contaminación se puede considerar que son los bioefluentes humanos producidos por la elevada ocupación del aula.

Se consideran las condiciones estimadas de CO<sub>2</sub> (400 ppm exterior y 600 ppm por encima del nivel exterior), el nivel máximo de ocupación en el aula (25 alumnos) y una actividad metabólica de 1,2 met. Aplicando estos datos a la fórmula de la Fig.5.39 se obtiene una renovación de 8,4 l/seg persona (en lugar del valor por defecto que indica el RITE para SVM de 12,5 l/seg persona). Este es un valor más adecuado para optimizar el caudal de ventilación y minimizar las pérdidas. Cabe señalar también que 8 l/s persona es la cantidad indicada por el BB101 (normativa del Reino Unido) para el diseño y dimensionamiento de los SVN en sus edificios escolares.



**SVM:** En principio se calculó el sistema para obtener el caudal de ventilación resultante de aplicar la ratio de 12,5 litros/segundo y persona, que es valor promedio fijo que establece el RITE en su Instrucción Técnica para el diseño de los SVM. No obstante, finalmente se calculó para los 8,4 litros/segundo y persona que se obtienen de aplicar los rangos considerados en la UNE EN-13779 (Tabla 5.22), también viable aunque no está expresamente especificado en la Instrucción Técnica del RITE. De este modo, es posible comparar los resultados de cálculo con los que se obtienen de la simulación termodinámica de SVN en igualdad de condiciones. En resumen, los valores de caudal de renovación de aire para cada tipo de aula estudiada se detallan en la Tabla 5.22.

**Tabla 5.22.** Parámetros de diseño de las aulas (fuente: elaboración propia)

AULA TIPO	Superficie m <sup>2</sup>	Altura m	Volumen m <sup>3</sup>	Número de estudiantes	Renovación de aire l/s (*persona) (1)	Renovación de aire (renovaciones/ hora)
1-2	50	3	150	25	8,4	5
3	24	3	72	8	8,4	3,3

(1) Según BB101 y aplicación de la UNE EN 13779 a la que remite el RITE.

### 2.1.3 Edificio modelo

El edificio utilizado como demostrador constituye una tipología muy habitual y extendida en el parque público andaluz, tanto por superficie construida como por número de aulas y alumnos. Este prototipo (Fig.5.31) que se ha utilizado como modelo de cálculo, se definió por la administración para que sirviera de referencia para los nuevos diseños de edificios escolares permitiendo una puesta en uso rápida y ágil. Se desarrolla en planta baja y primera y está concebido para la educación primaria (estudiantes de 3 a 12 años de edad). Sus características generales básicas de diseño se presentan a grandes rasgos en la Fig.5.40 y la Tabla 5.23.

**Tabla 5.23.** Resumen de características básicas del edificio modelo

<b>Descripción</b>	Dos plantas (baja más primera) / 27 aulas tipos 1-2 y 6 aulas tipo 3
<b>Sistema de calefacción</b>	Radiadores de agua caliente con producción central en caldera
<b>Sistema de ventilación</b>	SVN y SVM
<b>Dimensiones del aula</b>	Aulas tipo 1 y 2 superficie =50 m <sup>2</sup> ; volumen =150 m <sup>3</sup> ; Aula tipo 3 superficie=24 m <sup>2</sup> , volumen=75 m <sup>3</sup> , altura 3 m (1,2 y 3)
<b>Ocupación</b>	25 estudiantes y 1 profesor (total alumnos centro 675)
<b>Nivel educativo</b>	Educación infantil y primaria (3-12 años)
<b>Nivel de iluminación</b>	500 lux
<b>Cerramiento</b>	Fábrica de ladrillo de 2 hojas con aislamiento intermedio / carpintería aluminio vidrio doble, hoja corredera
<b>Cubierta</b>	Cubierta plana invertida sobre forjado con aislamiento térmico
<b>Ambiente exterior</b>	No contaminado y con bajo nivel de ruido



**Fig.5.40.** Plantas del edificio modelo (baja y alta). (fuente: reproducido de (Gil-Baez et al., 2017))



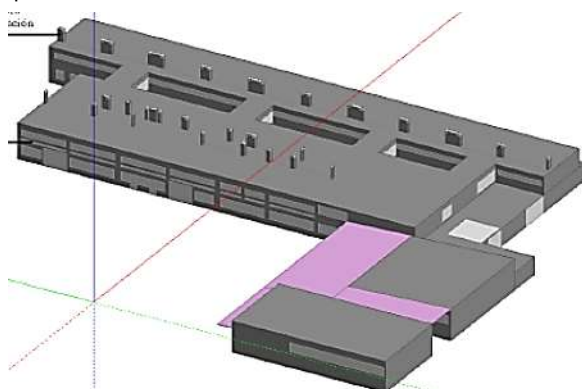
Los dos sistemas de ventilación (SVN y SVM) se integraron en el edificio demostrador. Sobre este

modelo de cálculo se realizan dos simulaciones del mismo edificio en diferentes zonas climáticas (ZC) funcionando primero con VM y luego con VN, con el objeto de comparar el consumo en ambos casos y compararlos. Como ZC se analizan aquéllas correspondientes a cada una de las capitales de provincia andaluzas, según la clasificación establecida por el CTE, para tener una muestra completa de la geografía de la región. El combustible para el cálculo de la instalación de calefacción varía en función de la ZC, considerándose el más habitualmente utilizado, o con mayor potencial de utilización (gasóleo, gas natural o biomasa). Las condiciones de funcionamiento consideradas en el cálculo se resumen en la Tabla 5.24.

**Tabla 5.24.** Condiciones de funcionamiento

<b>Curso escolar</b>	Días del curso escolar (según el calendario escolar, 182 días de septiembre a junio) Horas de la jornada docente (5 horas diarias de lunes a viernes de 9 a 14) Nº total de horas = 910 horas anuales
<b>Zonas climáticas</b> (capitales de provincia)	A3: Málaga y Cádiz A4: Almería y Huelva B4: Sevilla y Córdoba C3: Granada C4: Jaén
<b>Aulas</b>	Ocupación del aula (1 persona cada 1,5 ó 2 m²) Las ventanas se han definido sin persianas y sin protecciones solares Orientación del edificio con el eje mayor N-S Tipos de aula: AUP = aprox 50 m²; AUI = aprox 50 m²; TUT = aprox 25 m²

**Edificio a.1. Edificio Modelo con VN.** La estrategia de VN se desarrolla en cada una de las aulas como unidades de uso independientes (según se ha descrito anteriormente). Se basa en efecto chimenea y la ventilación cruzada. La admisión de realiza en el frente de fachada de cada aula y la expulsión se realiza por dos conductos por aula ubicados en la pared opuesta a fachada y conectados con la cubierta (Fig.5.37). El desarrollo de los conductos es individual para cada aula, no compartiéndose entre las aulas superpuestas en altura. En la Fig.5.41 se representa el esquema de edificio con este sistema de ventilación en cada una de sus aulas.



**Fig.5.41.** Edificio Modelo de cálculo con SVN

**Tabla 5.25.** Parámetros de calefacción y ventilación para el Edificio a.1

ZC	CALEFACCIÓN		VENTILACIÓN	
	Sistema de calefacción	Combustible	Sistema de ventilación	Combustible
B4 C4 C3	Radiadores de agua con caldera central	Biomasa	SVN	ninguno
A3	Radiadores de agua con caldera central	Gas natural	SVN	ninguno
A4	Radiadores de agua con caldera central	Gasóleo	SVN	ninguno

**Edificio b.1 Edificio Modelo con VM.** Este sistema se basa en los modelos definidos en el proyecto Academia (Grupo TEP 130, n.d.), definiéndose un SVM con recuperación de calor, con UTAs en cubierta que distribuyen el aire a las aulas a través de conductos de impulsión y de retorno, desarrollados en circuitos independientes. En la Fig.5.42, se muestran las cubiertas de edificios escolares con este tipo de sistema.





Fig.5.42. SVM. UTAs en cubierta (fuente: propia)

Tabla 5.26. Parámetros de calefacción y ventilación para el Edificio b.1

ZC	CALEFACCIÓN	Combustible	VENTILACIÓN	Combustible
	Sistema de calefacción		Sistema de ventilación	
B4 C4 C3	Radiadores de agua con caldera central	Biomasa	UTAs con recuperador de calor	electricidad
A3	Radiadores de agua con caldera central	Gas natural	UTAs con recuperador de calor	electricidad
A4	Radiadores de agua con caldera central	Gasóleo	UTAs con recuperador de calor	electricidad

## 2.2 Cálculo

### 2.2.1 Metodología

Para estudiar el correcto desempeño del SVN se analizan dos aspectos: i) se estudia comparativamente el consumo debido a la operación del edificio, en las mismas condiciones, utilizando uno u otro sistema y ii) se analiza específicamente la eficacia de la operación del SVN en cuanto a la efectiva tasa de renovación del aire como a su efectiva circulación. Para ello se llevan a cabo las siguientes comprobaciones:

- Consumo de energía.** Se realizan simulaciones termodinámicas del edificio funcionando a lo largo del curso escolar para ambos casos: con VN (Edificio a.1) y con VM (Edificio b.1), para cada zona sub-climática.
- Eficacia del SVN.** Para comprobar la eficacia del SVN se analiza la tasa de renovación para todos los casos y se comprueba la efectiva renovación del aire interior con el módulo CFD.

Se utiliza el programa DesignBuilder (Gil-Baez et al., 2017) para realizar las simulaciones y obtener los consumos de energía del edificio con uno u otro sistema de ventilación. Integra Energyplus ("EnergyPlus | EnergyPlus," n.d.), un programa de simulación de energía desarrollado por DOE para modelar la calefacción, refrigeración, iluminación, ventilación y otros flujos de energía de los edificios. Se selecciona por ser un programa extendido comercialmente y reconocido internacionalmente. Permite analizar los consumos de energía debidos al funcionamiento. Además dispone de un módulo de cálculo de CFD, que permite determinar la circulación del aire en base a las condiciones de contorno del edificio.

### 2.2.2 Resultados

- Consumo de energía.** Se estudian y comparan las demandas totales de energía (considerando los sistemas de climatización, iluminación, equipos, etc.) en ambos casos. Los resultados obtenidos para el edificio en cada una de las ZC permiten analizar el funcionamiento durante todo el año escolar (desde mediados de septiembre hasta mediados de junio). Los resultados de cálculo en relación a los consumos y emisiones de CO<sub>2</sub> se presentan por Gil-Báez et al. en la publicación "Natural ventilation systems in 21st-century for near zero energy school buildings" (Gil-Baez et al., 2017). El consumo de energía final se obtiene a partir de simulaciones, mientras que la energía primaria y las emisiones de CO<sub>2</sub> se obtienen aplicando los coeficientes de conversión oficiales expuestos en la Tabla 5.27 (MINETUR, 2014).

Tabla 5.27. Factores de conversión

Combustible	Energía primaria	Emisión CO <sub>2</sub>
Biomasa	1,113	0,018
Gas Natural	1,195	0,252
Gasoil	1,182	0,311
Electricidad	2,461	0,399

Los coeficientes de conversión son los publicados por el Ministerio (MINETUR, 2014) y están basados en el informe "Well to tank report, version 4.0" del Joint Research Institute (Edwards, Larive, Rickeard, & Weindorf, 2013)

Tabla 5.28. Edificio a.1 (SVN). Uso energía total y emisiones de CO<sub>2</sub>

Zona climática	Consumo / emisiones		
	Energía final kWh	Energía primaria kWh	Emisiones CO <sub>2</sub> kg
B4	66.446,64	105.473,26	10.104,36
A3	55.244,97	95.064,98	17.294,52
C4	79.323,18	119.534,98	10.400,58
C3	89.073,80	130.386,19	10.575,75
A4	49.111,57	87.211,25	17.240,13

Tabla 5.29. Edificio b.1 (SVM). Uso de energía total y emisiones de CO<sub>2</sub>

Zona climática	Consumo / emisiones		
	Energía final kWh	Energía primaria kWh	Emisiones CO <sub>2</sub> kg
B4	74.998,81	149.853,32	20.111,58
A3	71.979,56	148.415,54	25.384,34
C4	95.004,77	172.496,71	20.718,90
C3	103.601,56	182.071,53	20.875,50
A4	66.774,31	141.776,52	25.051,10

En las Tablas 5.28 y 5.29 se representa el consumo de energía final del edificio funcionando con un SVN (Tabla 5.28) y con un SVM (Tabla 5.29), así como los valores de energía primaria y emisiones de CO<sub>2</sub>.

- ii. **Comprobación de la eficacia del SVN.** En el programa de cálculo se activó también el módulo CFD para comprobar la efectiva circulación del aire a través del espacio a ventilar. Se comprobaron el número de renovaciones hora que se obtenían en cada uno de los casos simulados, realizándose una comprobación instantánea y una comprobación a lo largo del periodo de simulación. La simulación para obtener los datos instantáneos se realiza en el aula polivalente de primaria AUP5, ubicada en planta primera con orientación de la fachada a Este (aula vacía, sin muebles, ventanas sin persianas ni lamas). Un ejemplo gráfico de los resultados gráficos se representa en la Fig. 5.43.

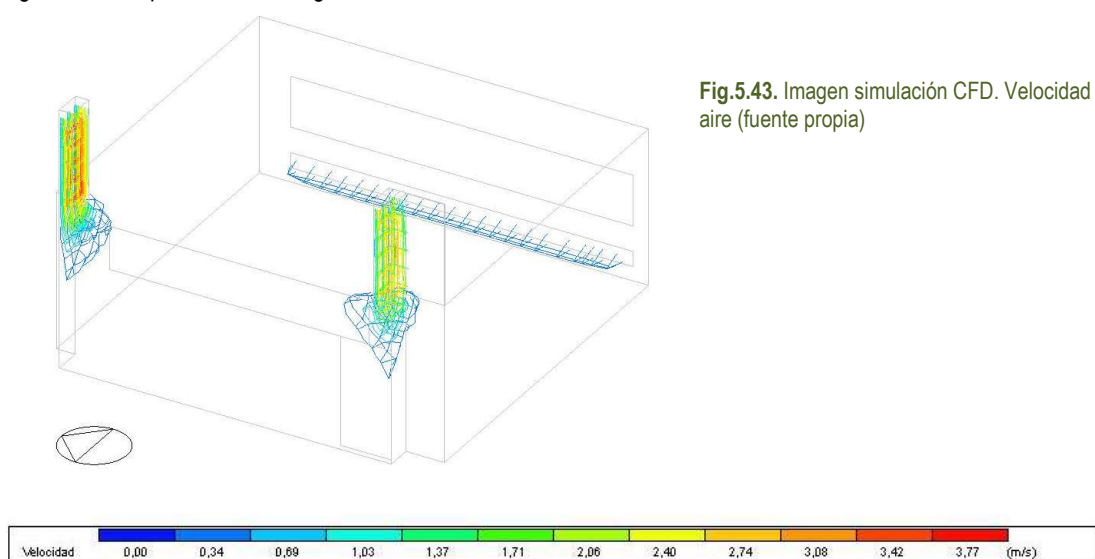


Fig.5.43. Imagen simulación CFD. Velocidad del aire (fuente propia)

## 2.2.3 Análisis y discusión

**Edificio a.1. Modelo de edificio con VN.** Los resultados en la Tabla 5.28 muestran mayores consumos en términos de energía final y primaria en las zonas sub-climáticas C3 y C4, mientras que las zonas sub-climáticas A3 y A4 presentan los consumos más bajos. La ZC B4 muestra un nivel de consumo medio. La diferencia entre el consumo más alto y el más bajo es de casi 40.000 kWh (C3-A4). Sin embargo, las emisiones de CO<sub>2</sub> son más altas en las zonas A3 y A4, y son igualmente más bajas en las zonas C3, C4 y B4. Estas altas emisiones se deben al uso considerado de la biomasa como combustible, que se considera una energía renovable a los efectos de consumo de energía primaria y emisiones de CO<sub>2</sub> y así se refleja en los factores de conversión, que son más bajos que los correspondientes a electricidad o combustibles fósiles.

**Edificio b.1 Modelo de edificio con VM.** En las simulaciones de funcionamiento del SVM (Tabla 5.29) se repite el patrón de consumo reflejado en el caso anterior. Los consumos más altos en términos de energía final se dan en las ZC C3 y C4, mientras que las ZC A3 y A4 presentan los consumos más bajos. La ZC B4 muestra un nivel de consumo medio. La diferencia entre el consumo más alto y el más bajo supera los 36.000 kWh (C3-A4). En este caso, la situación de las emisiones de CO<sub>2</sub> es similar a la del caso SVN en relación al tipo de combustible y los factores de conversión aplicables.

**Comparación entre el Edificio a.1.y el Edificio b.1.** En la Tabla 5.30, se realiza una comparación entre los resultados mostrados en las Tablas 5.28 y 5.29, en términos de reducción del consumo de energía entre el funcionamiento del edificio con SVM ó SVN.

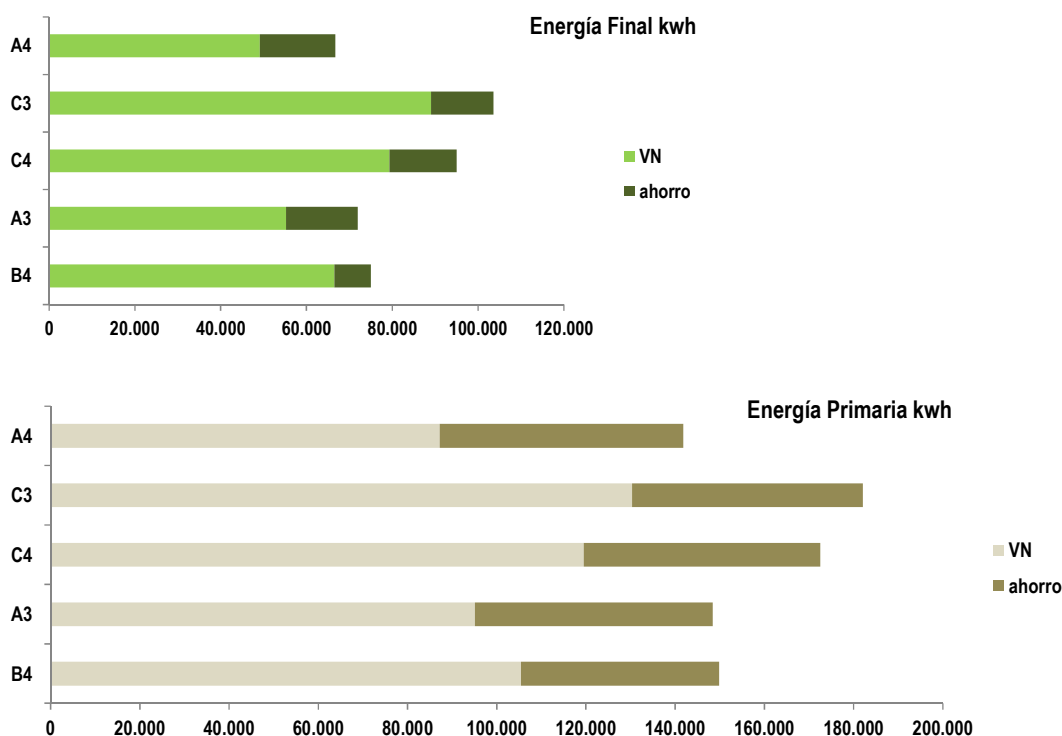
**Tabla 5.30.** Reducción del consumo de energía (SVM-SVN). (fuente: elaboración propia)

Zona sub-climática	Consumo					
	Energía final		Energía primaria		Emisiones CO <sub>2</sub>	
	Dif. en kWh	Ahorro	Dif. en kWh	Ahorro	Dif. en kg	Ahorro
B4	8.552,17	11,40%	44.380,06	29,62%	10.007,22	49,76%
A3	16.734,59	23,25%	53.350,55	35,95%	8.089,83	31,87%
C4	15.681,59	16,51%	5.2961,73	30,70%	10.318,31	49,80%
C3	14.527,76	14,02%	51.685,34	28,39%	10.299,75	49,34%
A4	17.662,74	26,45%	54.565,27	38,49%	7.810,97	31,18%

En la Tabla 5.30, se muestra la reducción en el consumo de energía utilizando un SVN en lugar de un SVM, en términos de energía final y primaria, así como también los ahorros de emisiones de CO<sub>2</sub>. Los mayores ahorros de energía se obtienen en las zonas A4 y A3.

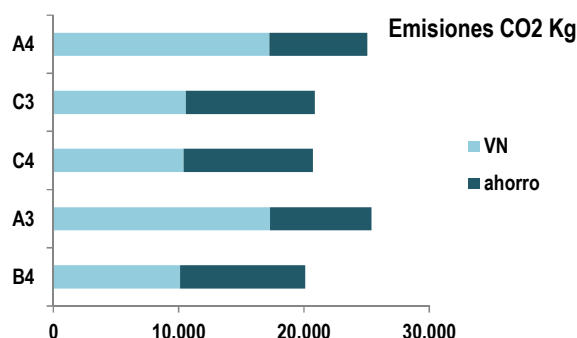
Los ahorros de energía final son 26,45% en la zona A4 y 23,25% en la zona A3. En términos de energía primaria, los ahorros se sitúan en torno al 35%, (38,49% en la zona A4 y 35,95% en la zona A3). Estos resultados muestran que los SVN tienen el potencial de ahorrar más del 30% de las emisiones de CO<sub>2</sub> en ambos casos. Sin embargo, en las otras tres zonas climáticas, los ahorros de energía final y primaria son menores: 16,51% en la zona C4, 14,02% en la zona C3 y 11,40% en la zona B4 en términos de energía final; y el 30,70% en la zona C4, el 29,62% en la zona B4 y el 28,39% en la zona C3 en términos de energía primaria. Sin embargo, la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> es mayor, en torno al 50%. Esto se debe al menor uso de energía en las zonas B4, C3 y C4 combinadas con el tipo de combustible utilizado en cada zona para calefacción. En las zonas A4 y A3, el tipo de combustible utilizado en las simulaciones es el gas natural y el gasóleo, respectivamente, y la biomasa en las demás, como se puede observar en las Tablas 5.25 y 5.26.

En las Fig.5.44 y 5.45 se representan gráficamente los resultados, en los cuales puede apreciarse el mejor comportamiento de los SVN en todos los casos analizados.



**Fig.5.44.** Representación del consumo energético del SVN y el ahorro energía en comparación con el SVM (kWh). Izda.) Energía final; dcha) Energía primaria. (fuente: elaboración propia)

En la Fig.5.44 se observa el ahorro potencial de energía debido al uso de SVN para cada ZC. Utilizando un promedio de los resultados, el ahorro esperado en energía final es de alrededor del 18%, y del 33% en términos de energía final y primaria. En valores absolutos, es posible ahorrar 14.600 kWh por año (energía final) en un edificio escolar mediante el simple reemplazo del SVM por un SVN.



**Fig.5.45.** Representación de las emisiones de CO<sub>2</sub> (kg) debidas al funcionamiento del SVN y la reducción de emisiones en comparación con el funcionamiento del SVM (fuente: elaboración propia)

En la Fig. 5.45, se representa la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. En este caso, el promedio de reducción anual estimado supera los 9.300 kg en cada edificio escolar. Si se extrapolan estos resultados a los 5.000 edificios escolares que componen el parque público andaluz (en promedio de los resultados obtenidos para cada ZC), utilizando SVN en lugar de sistemas mecánicos, se evitaría la emisión de 46.500 toneladas de CO<sub>2</sub> anuales.

## 2.2.4 Conclusiones sobre el modelo teórico

Con los resultados obtenidos de la simulación (cálculo de consumos de energía y simulación CFD) se han realizado las siguientes comprobaciones:

- i) **Energía:** Un edificio escolar funcionando en el ámbito geográfico de estudio con VN consume menos energía que el mismo en las mismas condiciones funcionando con VM (simulación termodinámica), ya que se obtienen menores consumos de energía en funcionamiento anual del SVN para todos los casos en todas las zonas climáticas, lo cual valida el sistema desde el punto de vista de la eficiencia energética
- ii) **Eficiencia:** Es posible controlar adecuadamente la CAI en los espacios dotados de VN, ya que se verifica la circulación del aire a través del espacio desde la admisión en fachada hacia las chimeneas de ventilación ("shunts"), por lo que éste se renueva, permitiendo eliminar los contaminantes (CFD).

Comprobados estos dos puntos identificados al principio del apartado (energía y eficacia), se propone un modelo estándar, que se pueda extrapolar a los nuevos edificios escolares sin necesidad de realizar un cálculo y diseño específicos en cada nuevo caso concreto.

Finalmente, se resumen las comprobaciones enunciadas en la hipótesis en el Capítulo 2 y descritas en el apartado 3.4 del Capítulo 4 "Bases para el planteamiento de una solución alternativa", en cuanto a las exigencias técnicas a satisfacer por los sistemas de ventilación (Tabla 4.17), resumiéndose el cumplimiento de las exigencias técnicas en lo relativo a la ventilación en la Tabla 5.31.

**Tabla 5.31.** Cumplimiento de las Exigencias Técnicas de la solución de ventilación alternativa con un SVN

<b>Bienestar e higiene</b>	Calidad térmica del ambiente	Mantener los parámetros del ambiente térmico dentro de un intervalos determinados para unas condiciones ambientales confortables	Se cumple con la instalación de calefacción
	Calidad del Aire Interior	Calidad del aire interior aceptable, en los <b>locales ocupados por las personas, eliminando los contaminantes que se produzcan de forma habitual durante el uso normal de los mismos</b> , aportando un caudal suficiente de aire exterior y garantizando la extracción y expulsión del aire viciado	Se demuestra que se eliminan los contaminantes que se producen de forma habitual en los locales ocupados por las personas durante el uso normal de los mismos (CO <sub>2</sub> ), con un caudal de renovación de aire que es suficiente para la efectiva renovación del aire del interior del espacio
	Higiene	Proporcionar una dotación de agua caliente sanitaria, en condiciones adecuadas, para la higiene de las personas	Se contempla en las instalaciones del edificio
	Calidad del ambiente acústico	Limitación en condiciones normales de utilización el riesgo de molestias o enfermedades producidas por el ruido y las vibraciones de las instalaciones térmicas	Los SVN no producen ruidos ni vibraciones
	Rendimiento energético	Las prestaciones de los equipos estarán cercanas al régimen de rendimiento máximo	Las prestaciones de los equipos estarán cercanas al régimen de rendimiento máximo
<b>Eficiencia energética</b> <b>Procedimiento alternativo para su justificación (IT1.2.2.2):</b> consistirá en la adopción de soluciones alternativas, entendidas como aquellas que se apartan parcial o totalmente de las propuestas de esta sección, basadas en la limitación directa del consumo energético de la instalación térmica diseñada.	Distribución de calor y frío	Los equipos y conducciones irán aislados	Se contempla en las instalaciones del edificio
	Regulación y control	Para que las instalaciones puedan ajustar los consumos a las variaciones de demanda térmica así como interrumpir el servicio	La actuación del Sistema de VN se actúa mediante sondas de medición de CO <sub>2</sub> y automatización de las aperturas al exterior
	Contabilización de consumos	Para que el usuario conozca el consumo de energía	Se contempla en las instalaciones del edificio
	Recuperación energía <sup>(1)</sup>	Subsistemas que permitan el ahorro, la recuperación de energía y el aprovechamiento de energías residuales	No se utiliza energía convencional por lo que no es necesaria su recuperación. El sobregasto en calefacción es menor que el consumo del funcionamiento de los recuperadores
	Utilización de energías renovables	Aprovecharán las energías renovables disponibles, con el objetivo de cubrir con estas energías una parte de las necesidades del edificio	Se utiliza la acción el propio viento en movimiento
<b>Seguridad</b>	<b>Se prevenga y reduzca a límites aceptables el riesgo de sufrir accidentes, siniestros, molestias o enfermedades</b>		Se elimina la posibilidad de sufrir molestias y enfermedades por un defectuoso mantenimiento de Sistemas de VM

(1) En cuanto a la recuperación de calor, el RITE establece en la IT 1.2.4.5.2 la obligación de recuperar el aire de extracción en "los sistemas de climatización de los edificios en los que el caudal de aire expulsado al exterior, por medios mecánicos, sea superior a 0,5 m<sup>3</sup>/s".

## 2.3 Diseño del sistema

El modelo teórico utilizado en los cálculos se traslada a un modelo real estandarizado, pensado para poder implementarse en el diseño del aula de cualquier centro educativo independientemente de su localización. El diseño del modelo estándar se realiza atendiendo a cuestiones técnicas, constructivas, de funcionamiento y mantenimiento de los centros educativos y teniendo en cuenta el marco geográfico de actuación. Se busca como resultado el diseño de un SVN estandarizable con el fin de su adaptación a diferentes ubicaciones climáticas en los nuevos edificios que se diseñen.

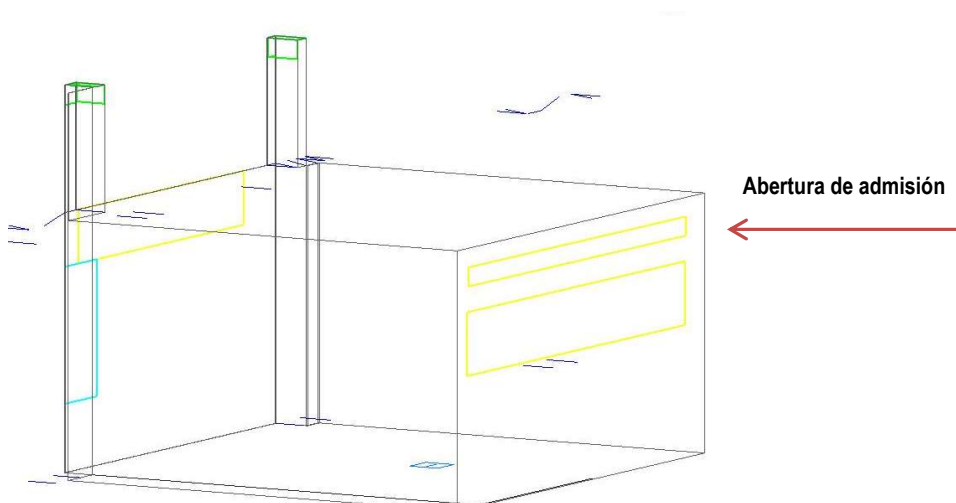
El sistema estándar se define en base a criterios objetivos. En la selección de los elementos, dimensiones, etc.. se han tenido en cuenta las condiciones reales y la viabilidad del diseño, construcción y uso, para que sean efectivos en relación a la forma habitual de funcionamiento y de mantenimiento de los edificios educativos, evitando soluciones de compleja ejecución, dificultad de suministro del producto en obra o dificultad de asistencia de un servicio técnico, que hagan inviable la ejecución y utilización del dispositivo durante la contratación y ejecución de las obras del edificio o a lo largo de la vida útil del mismo.

### 2.3.1 Descripción

Se diseña un Sistema de Ventilación Natural Inteligente (SVNI) en cada aula. Su funcionamiento se basa en la acción de las fuerzas naturales debidas al viento y la diferencia de presiones, utilizándose los principios de ventilación cruzada y efecto chimenea.

**Esquema de diseño.** Las admisiones se disponen en fachada y la salida del aire (expulsión) se realiza a través de dos “shunts” de ventilación con rejillas en el paramento opuesto, ubicados a la altura del techo, que se conectan con sendas chimeneas en la cubierta.

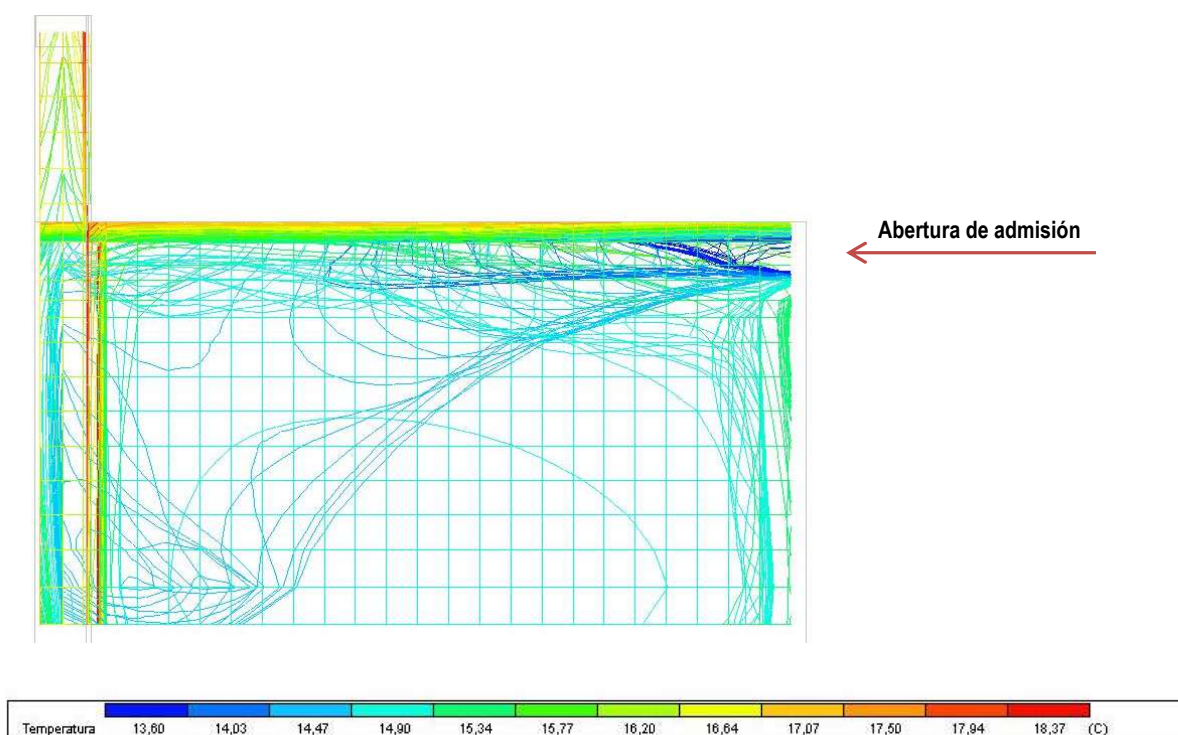
En base a los criterios de simplicidad del diseño y facilidad de mantenimiento, se opta por ubicar las admisiones de aire en la parte superior de la ventana de fachada, disponiéndose en el conjunto del diseño un paño superior practicable, abatible en eje horizontal, específicamente diseñado para la ventilación del SVNI. Este elemento sigue las pautas de casas comerciales especializadas, que basan este diseño en estudios específicamente desarrollados para estos sistemas de ventilación inteligente en edificios escolares, tal como se muestra en la Fig.5.32 y en otros estudios recogidos en el Estado del Arte (Capítulo 1, Fig.1.42). El esquema de ubicación queda como se muestra en la Fig. 5.46.



**Fig.5.46.** Representación de la ubicación de las admisiones en la zona superior de la fachada (fuente: elaboración propia)

La eficacia de la entrada del aire a través de la admisión en esta posición se comprueba con el módulo CFD, obteniéndose resultados como los que se reflejan en la Fig.5.47.

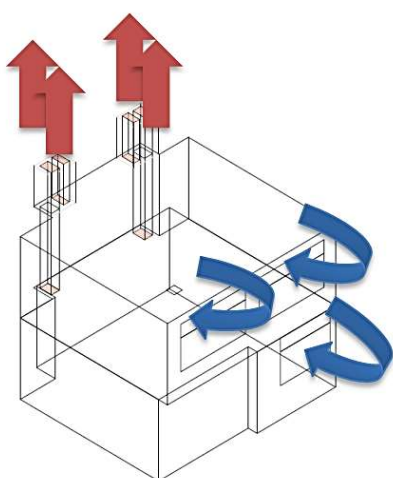




**Fig.5.47.** Representación de la distribución de la temperatura con las admisiones ubicadas en la zona superior de la fachada (fuente: elaboración propia).

En la Fig.5.47 se representa la distribución de la temperatura con la disposición de las admisiones en la zona superior de la fachada, comprobándose el comportamiento similar al descrito por Heiselberg et al. (Heiselberg, Bjørn, & Nielsen, 2017) y representado en la Fig.1.42 del Capítulo 1. Con esta disposición, el aire exterior de admisión no produce corrientes frías, ya que al introducirse a un nivel elevado se “precalienta” por el aire interior y las superficies internas que están a mayor temperatura. El aire de admisión, además se “adhiere” al techo por la velocidad de entrada y el “efecto coanda”, minimizando aún más la posibilidad de la sensación de corriente de aire.

En cuanto a la expulsión, como en el diseño del sistema cada aula es independiente del resto, las chimeneas son específicas de cada unidad de uso (aula), no compartiendo ninguna parte del recorrido ni con aulas adyacentes ni con otras superpuestas en planta, según se refleja en las Fig.5.48.



**Fig.5.48.** Esquema de diseño: de las aulas superpuestas independientes. (fuente: propia)

**Condiciones de funcionamiento y operación.** Para el funcionamiento del SVNI se plantea un diseño automatizado de funcionamiento de las ventanas, que operan en función de la información que reciben de una

sonda de CO<sub>2</sub>. La sonda mide los niveles de concentración de CO<sub>2</sub> interior, enviando una señal al actuador de la ventana para que se abra y se cierre en función de los niveles inferior y superior que se programen. La ubicación de la sonda se realiza en base a criterios de centralidad, racionalidad organizativa y no interferencia con la actividad lectiva y los usuarios.

El sistema definido es totalmente automático, de modo que las admisiones se automatizan siendo actuadas por una sonda que mide la concentración de CO<sub>2</sub> ambiente, enviando una señal a un automatismo que abre la ventana cuando se supera el nivel de consigna predeterminado.



**Fig.5.49.** Elementos de automatización del SVNI. Izda.) Sonda de medida (fuente <https://www.elsner-elektronik.de>); dcha.) Ventana automatizada (fuente: [www.interempresas.net](http://www.interempresas.net))

En la Fig.5.49 se muestra un ejemplo de sonda y una ventana automatizada. Sin embargo, existen otras soluciones recomendadas por la OMS (WHO Regional Office for Europe, 2015), que involucran al usuario del aula en la operación de las ventanas, como son los indicadores de CAI y los pulsadores para su operación que se muestran en la Fig.5.50.



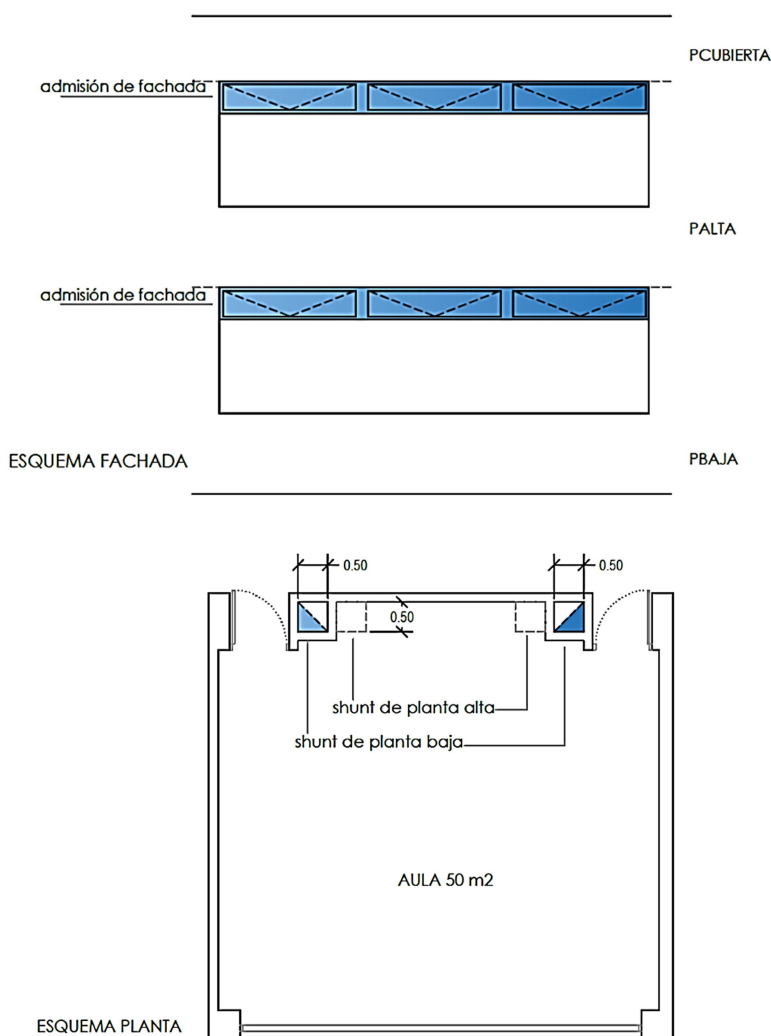
**Fig.5.50.** Mecanismos para la operación de las ventanas automática por parte del usuario. Izda.) indicador de la CAI Lum'Air, específico para la medida y control en escuelas; dcha.) interruptor para la apertura de las ventanas automáticas. (Reproducidos de (CIBSETM57, 2015)).

**Prestaciones.** El sistema de VNI ofrece las siguientes prestaciones a los usuarios del edificio:

1. Mejora las condiciones para la enseñanza y el aprendizaje: No produce ruidos; no conlleva problemas relacionadas con la salubridad por falta de mantenimiento.
2. Es un sistema que permite diseñar edificios más sostenibles: En cuanto al consumo de energía: no consume energía en su operación; En cuanto a las emisiones: No produce emisiones de CO<sub>2</sub>; No tiene asociados gastos de funcionamiento ni de mantenimiento; Colabora en la reducción del sobrecalentamiento del espacio interior. Permite la posibilidad de ser utilizado para refrigeración pasiva como estrategia de enfriamiento nocturno en época calurosa.
3. Carácter positivo para la educación y la enseñanza: Propicia la educación y la enseñanza en el marco de la educación ambiental; Permite liberar partidas presupuestarias para su utilización en acciones académicas.

### 2.3.2 Modelo final del sistema estándar para aulas

Se propone un sistema estándar basado en su definición principios de simplificación constructiva y facilidad de ejecución y de elección de materiales y soluciones constructivas. Para ello, la admisión se realizará a través de la ventana alta de eje horizontal de dimensiones 0,50 m de altura. Esto puede suponer una superficie de admisión superior a la calculada, pero no hace perder eficacia al sistema y garantiza la viabilidad de su puesta en obra. La expulsión se realiza a través de las chimeneas, las cuales se dimensionan todas de la misma sección, superior en algunos casos a las obtenidas estrictamente por cálculo, simplificando de esta manera el diseño y la ejecución y evitándose también con esta medida errores de puesta en obra.



**Fig.5.51.** Diseño del SVNI en una aula.  
Superior) fachada; inferior) planta  
(fuente: propia)

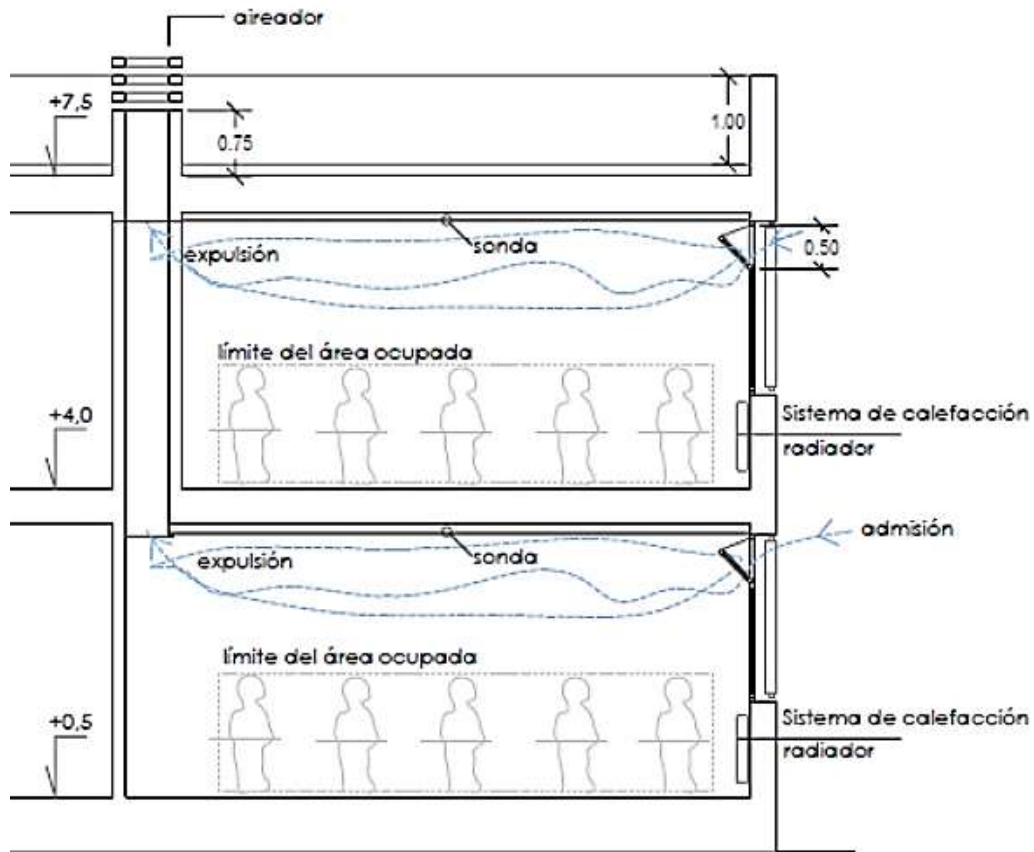


Fig.5.52. Sección del edificio prototipo con el sistema estándar de VNI en las aulas (fuente: propia)

En cuanto al aireador que se puede disponer en el remate exterior de la chimenea, los aireadores dinámicos presentan un mejor rendimiento que los estáticos, siendo posible además adicionarles un pequeño motor para contrarrestar los efectos de la inversión térmica, funcionando en este caso como un sistema de ventilación híbrido. Las imágenes de los tipos de aireador se recogen en la Fig. 5.53



Fig.5.53. Tipos de aireador en cubierta. (fuente: elaboración propia)

### 2.3.3 Condiciones generales que deben cumplirse para la utilización del sistema estándar

Para poder utilizar este SVNI en el edificio escolar, deberán tenerse en cuenta, además de las especificaciones para su diseño, las siguientes condiciones para el edificio en general:

1. El edificio en el que se incluye el sistema tiene las ventanas practicables y pueden abrirse sin limitaciones durante el uso efectivo del espacio docente (por ejemplo, no es un conservatorio). No obstante, incluso en este tipo de edificios especiales es recomendable diseñar el sistema, como complemento a otros, con la finalidad de poder dar servicio a otros usos, en su caso.
2. El edificio se implanta en una zona con buena calidad del aire exterior y exposición suficiente al viento.
3. El edificio tendrá como máximo planta baja más 2 alturas.
4. En el diseño de las soluciones constructivas y materiales empleados se tendrá en cuenta el control de las fuentes de emisión internas, utilizando materiales no emisivos (no se usan plásticos, ni pinturas, ni PVC, emisores de COV)
5. Se realizará una correcta ubicación de las admisiones. Las ventanas del SVNI se ubicarán junto al techo, en posición alta y fuera de la zona de ocupación, para evitar las corrientes de aire.
6. El aireador de remate de la chimenea en cubierta funciona mejor si es dinámico, con la opción de utilizar el modelo híbrido que funciona con un pequeño motor incluso en momentos de inversión térmica.
7. Se debe permitir al usuario controlar el sistema. Si las ventanas son automáticas, se incluirán interruptores para que puedan cerrarse a voluntad del ocupante.
8. El sistema se dispondrá preferentemente en aulas y espacios de uso docente con alta densidad de ocupación, no siendo necesario en despachos ni otros locales con diferentes características.
9. En el diseño del sistema se utilizarán materiales, mecanismos y soluciones robustas, que requieran un bajo nivel de mantenimiento.
10. En el proyecto se incluirá un plan de mantenimiento para el usuario. El usuario debe familiarizarse con el sistema para que aprecie su utilidad. Si es algo extraño o que percibe como poco práctico no lo usará.
11. Recomendaciones adicionales:
  - El edificio tiene buen aislamiento térmico, así como una adecuada hermeticidad y se han minimizado las infiltraciones.
  - Los edificios se diseñarán con alta masa térmica, para su mejor funcionamiento, como se muestra en la imagen (Fig.1.6 del Capítulo 1).

Así mismo, deberán disponerse elementos adecuados de protección solar de las ventanas para controlar el acceso de la radiación solar al interior del espacio y el sobrecalentamiento del espacio interior.





## **CAPÍTULO 6\_CASO DE ESTUDIO**

**MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS EDIFICIOS DE USO EDUCATIVO EN CLIMA MEDITERRÁNEO:  
Aplicación práctica de diseño y cálculo de Sistemas de Ventilación Natural**



## CAPÍTULO 6.- CASO DE ESTUDIO

1. **Implantación del sistema (edificio test)**
2. **Validación (Plan experimental 2ª parte: campaña de medidas en el edificio test)**

En este Capítulo 6 se expone el caso práctico de implementación del SVNI estándar, descrito en los capítulos anteriores, en las aulas de un edificio educativo de nueva construcción. Este edificio se utiliza como test para validar la eficacia de actuación del SVNI, por lo que se incluye también en el edificio un SVM para analizar comparativamente la operación de ambos. En el primer apartado del capítulo se describe el edificio y sus instalaciones y en el segundo apartado se expone el resultado de la campaña de medidas llevada a cabo sobre el mismo.

Esta experiencia se encuentra además incluida en la Estrategia Energética de Andalucía 2020 (EEA2020) de la Consejería de Empleo, empresa y Comercio (Consejería de Empleo, Empresa y Comercio, n.d.), con la acción GA\_3\_2. La EEA2020 se basa en los siguientes principios: i) Contribuir a un uso eficiente e inteligente de la energía, priorizando el uso de los recursos autóctonos sostenibles, así como los sistemas de autoconsumo; ii) Situar a los sectores de las energías renovables y del ahorro y la eficiencia energética como motores de la economía andaluza; iii) Garantizar la calidad del suministro energético, impulsando la transición de las infraestructuras energéticas hacia un modelo inteligente y descentralizado, integrado en el paisaje; iv) Actuar desde la demanda para hacer a la ciudadanía protagonista del Sistema Energético y v) Optimizar el consumo energético en la Administración de la Junta de Andalucía, mejorando la eficiencia de sus instalaciones e incorporando criterios de gestión orientados al ahorro energético.



## 1.- Implantación del SVN. Edificio test

### Resumen

En este primer apartado se describe el edificio utilizado como test, diseñado como experiencia piloto para analizar comparativamente el funcionamiento y prestaciones ofrecidas por los dos tipos de sistema de ventilación, un sistema de ventilación diseñado siguiendo las instrucciones técnicas del RITE para sistemas mecánicos (SVM) y un sistema alternativo de ventilación natural inteligente, basado en ventanas automáticas operadas por sondas de CO<sub>2</sub> que funciona sin consumo eléctrico (SVNI).

Parte de los datos y resultados reflejados en este capítulo se han presentado en los siguientes congresos:

- “38th AIVC - 6th TightVent - 4th Venticool Conference: "Ventilating healthy low-energy buildings" (Gil-Báez, Barrios-Padura, Molina-Huelva, & Roldán-Vendrell, 2017) University Of Nottingham. International Network on Ventilation and Energy Performance (INIVE) on behalf of the Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC), TightVent Europe (the Building and Ductwork Airtightness Platform), and venticool (the international platform for ventilative cooling. Brunel University London. The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE). <http://www.aivc2017conference.org> con el título “Natural ventilation systems in Mediterranean schools. A prototype experience in Andalusia as an alternative to mechanical ventilation”.
- “IV Congreso Edificios de Energía Casi Nula” (Congreso, Energ, & Nula, 2017) Grupo Tecmared. Secretaría de Estado para la Sociedad de la Información y la Agenda Digital, SESIAD – Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital. <http://www.congreso-edificios-energia-casi-nula.es/>, con el título “Potencial de los sistemas de ventilación natural pasiva en la reducción del consumo eléctrico. Proyecto piloto en un colegio en Andalucía”

### 1.- Implantación del SVN. Edificio test

1.1	Características generales .....	259
1.1.1	Sistema de calefacción .....	261
1.1.2	Sistemas de ventilación .....	261
1.2	Estimación de los consumos y emisiones de CO <sub>2</sub> .....	266
1.2.1	Consumo de energía primaria y emisiones de CO <sub>2</sub> .....	267
1.2.2	Costes de los sistemas y emisiones asociadas .....	267
1.3	Análisis de los datos y discusión .....	268

## 1.1 Características generales

El centro escolar se ubica en una zona de nueva urbanización del término municipal de Mairena del Aljarafe (Sevilla). Es una zona abierta, con una parcela expuesta al viento, sin edificaciones cercanas que produzcan obstrucciones y una buena calidad del aire exterior. La parcela de implantación tiene 12.100 m<sup>2</sup> de superficie aproximadamente. El edificio y su entorno inmediato se muestran en la Fig.6.1. El edificio es un Centro de Educación Infantil y Primaria, que escolarizará niños entre los 3 y los 12 años de edad. Las características del edificio se describen en la Tabla 6.1 y en la Fig.6.2.



**Fig.6.1.** Implantación del edificio. Vista aérea. (fuente: google maps)

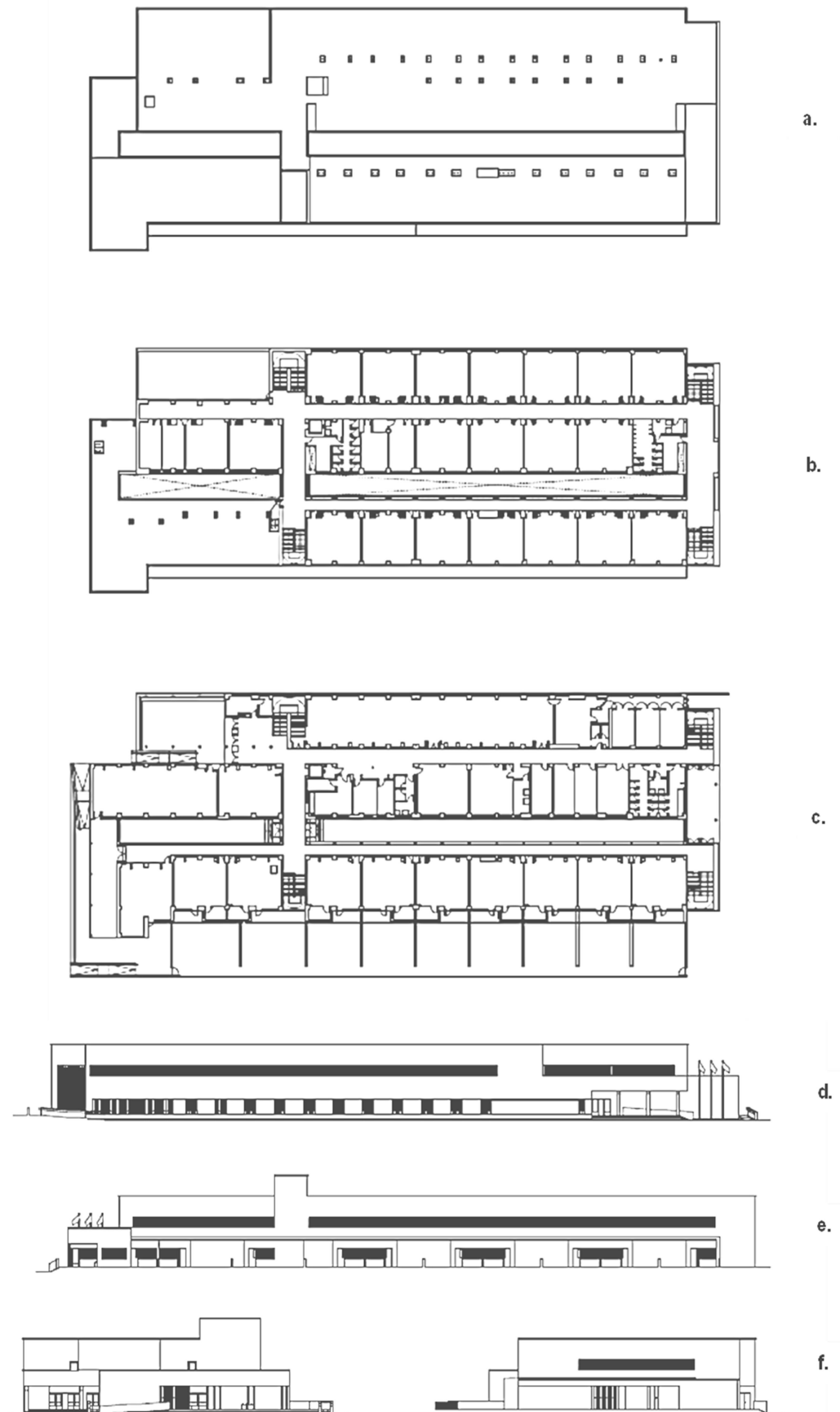
En la Fig.6.1 se muestra el conjunto del centro escolar en la zona donde se implanta. Se encuentra en una nueva zona residencial en expansión del área metropolitana de Sevilla capital, en la zona conocida como “cornisa del Aljarafe”, a 9,2 km de Sevilla capital y a una altura de 65 m sobre el nivel del mar. El edificio se encuentra rodeado de zonas de cultivos en la parte trasera y zonas verdes en el resto del perímetro. El frente de acceso es una vía de comunicación principal de la zona residencial, con carril con doble aparcamiento en cada sentido y bulevar central, siendo el ancho total de la vía del entorno de 20 los metros.

**Tabla 6.1.** Características del edificio

<b>Tipo de centro</b>	Colegio de Educación Infantil y Primaria (CEIP) tipo C3
<b>Nº líneas</b>	3 líneas de escolarización (9 unidades de infantil + 18 unidades de primaria)
<b>Nº aulas</b>	27 aulas polivalentes
<b>Nº máx alumnos</b>	675
<b>Año proyecto</b>	2016
<b>Año construcción</b>	2017-2018
<b>Coste edificio</b>	4.464.839,49 €
<b>Coste SVM</b>	233.257,51 € (5,29% del total)
<b>Coste SVNI</b>	59.515,76 €

El edificio presenta un desarrollo lineal con una relación eje mayor/eje menor aproximadamente 4/1. A su vez, se estructura en dos partes diferenciadas, la principal de triple crujía y dos plantas con la fachada principal a noroeste, separada por un patio interior de la otra zona que se desarrolla en doble crujía aula-pasillo (dando al patio), con fachada a sureste. En esta segunda parte hay una zona que sólo tiene planta baja. La superficie construida es de 4.363,41 m<sup>2</sup>. El acceso a cubierta se realiza mediante un castillete de subida de la escalera principal. La zona climática donde se ubica, según la caracterización de la AAE (Agencia Andaluza de la Energía, 2008) es C4. (Plantas y alzados Fig.6.2)





**Fig.6.2.** Plantas y alzados: a. Planta cubierta; b. Planta alta; c. Planta baja; d. Alzado principal; e. Alzado trasero; f. Alzados laterales. Reproducido del proyecto de ejecución (fuente: archivo APAE (Junta de Andalucía, n.d.))



**Fig.6.3.** Imágenes del edificio. Arriba) Fachada principal; abajo) Entorno inmediato de acceso. (fuente: propia)

### 1.1.1 Sistema de calefacción

El edificio se dota, siguiendo con las prescripciones de la normativa sectorial de referencia, de una instalación de calefacción con un sistema de producción centralizada en caldera y radiadores de agua caliente en cada una de las estancias ocupadas habitualmente por las personas como emisores térmicos.

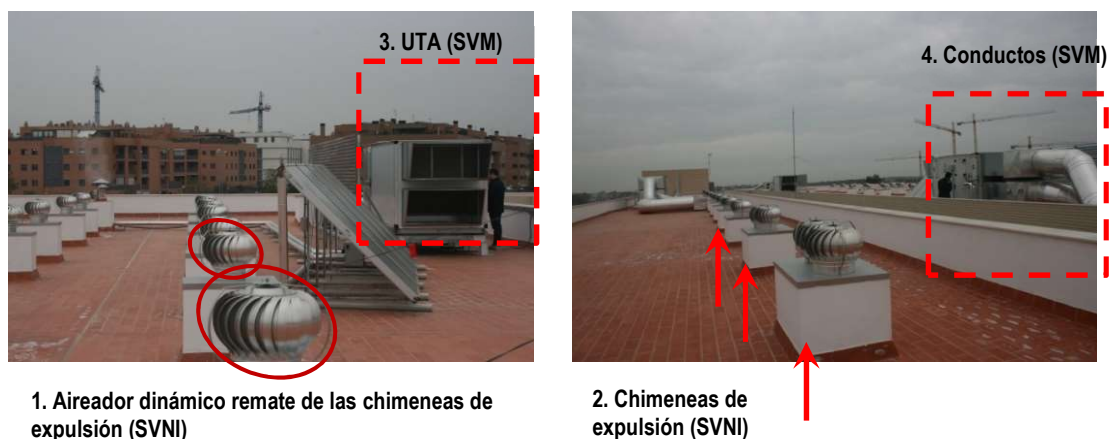
**Caldera.** Según datos del proyecto, el calentamiento del agua se produce con una caldera estanca de gas natural de condensación de 250 Kw, clase energética 4, con quemador modulante y con alimentación de combustible desde un depósito con un grupo de presión, ubicada en la planta baja del edificio en una sala específica. La caldera está dimensionada para abastecer tanto a los radiadores de las plantas baja y alta como a las UTAs (ubicadas en cubierta). Según los datos del proyecto, la demanda total anual de calefacción es de 85.181 Kwh.

**Batería de calor.** Cada una de las UTAs tiene una sección de batería de calor. Su finalidad es introducir el aire exterior de ventilación precalentado. Para ello se utiliza un circuito específico para las UTAs, procedente de la caldera del sistema de calefacción general del edificio. Las características de las baterías de calor se resumen en la Tabla 6.2.

### 1.1.2 Sistemas de ventilación

Este edificio se ha concebido como edificio test para analizar comparativamente el funcionamiento de un SVM y de un SVNI, ambos con la misma finalidad de garantizar la CAI en las aulas. Para ello, se han incluido los dos sistemas de ventilación en el diseño del edificio. El objetivo es el de estudiar comparativamente el funcionamiento y las prestaciones de ambos sistemas, constituyendo una experiencia piloto de la que extraer conclusiones para la

normalización de la utilización de este sistema alternativo de ventilación. En la Fig.6.4 se muestran imágenes de los componentes de los dos sistemas en la cubierta.



**Fig.6.4.** Imágenes de los dos sistemas en cubierta. Izda.) aireadores del SVNI y UTA del SVM; dcha.) chimeneas rematadas de aireadores (SVNI) y conductos de las UTAs (SVM) (fuente: propia)

**Sistema de Ventilación Natural-ventilación inteligente (SVNI).** El edificio incorpora un SVNI en los espacios de alta densidad de ocupación (uso docente y comedor). El SVNI, es alternativo al SVM y se ha diseñado en base en las recomendaciones generales recogidas en el Capítulo 5 de este documento y se han adecuado por el proyectista al caso concreto (Figs.6.5, 6.6 y 6.7).



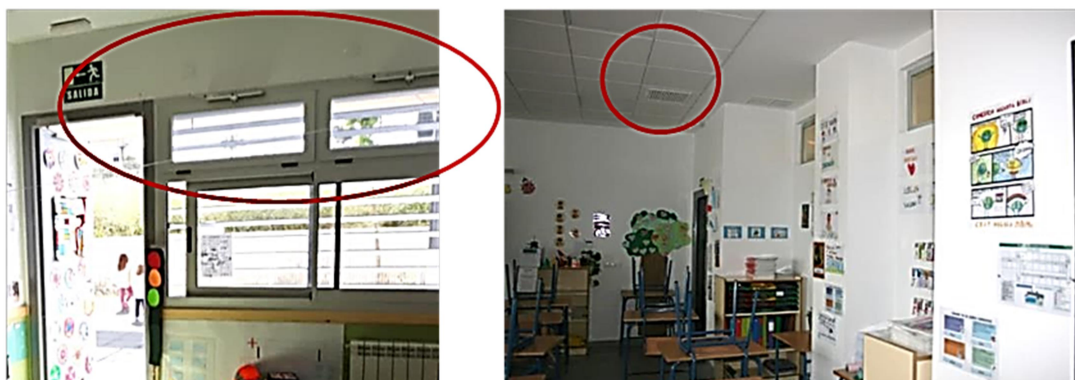
**Fig.6.5.** Fase de construcción: a. Fachada principal; b. Chimeneas en cubierta (SVNI); c. salidas de ventilación en aulas (SVNI); d. Detalle de la salida de ventilación (SVNI). (fuente: propia)

La admisión del aire se realiza a través de ventanas automáticas abatibles de eje horizontal, ubicadas en la fachada, en la zona superior del paramento y chimeneas de extracción ("shunts") dispuestas en el frente opuesto a la fachada conectadas con la salida a través de la cubierta (Fig.6.6 y 6.7). Estas chimeneas se rematan con un aireador dinámico (Fig.6.4.izda.1.), que funciona sin consumo eléctrico.

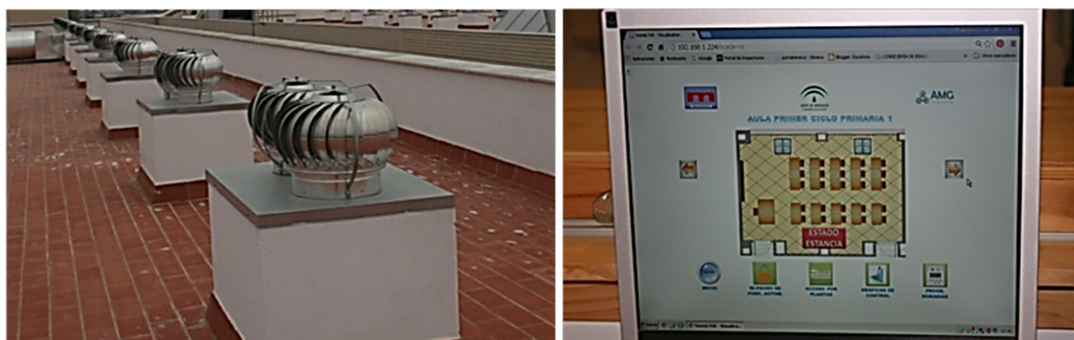
El sistema funciona controlando los niveles de CO<sub>2</sub> del interior de los locales mediante una sonda de medida. Una vez que se alcanza el umbral determinado, la sonda envía una señal a las ventanas automáticas diseñadas para



ventilación (Fig.6.6.izda.), operando su apertura y cierre cuando se alcanzan los niveles superiores e inferiores del umbral. Todas las sondas se encuentran controladas por un autómata KNX, que se encuentra en el espacio de conserjería, donde también hay un dispositivo para la visualización de las aulas y la programación y/o bloqueo de las mismas, en su caso.



**Fig.6.6.** Elementos del SVNI en el edificio test. Izda.) ventana automática y sonda; dcha.) rejilla conectada a chimenea (fuente: propia)



**Fig.6.7.** Elementos del SVNI en el edificio test. Izda.) chimeneas en cubierta; dcha.) imagen del autómata de control. (fuente: propia)

Las chimeneas de expulsión en cubierta se rematan por un aireador dinámico (Fig.6.7 izda.), que facilita la extracción incluso en ausencia de viento y colabora evitando el efecto de inversión térmica, constituyendo el conjunto un sistema híbrido en su funcionamiento. Los sensores de las aulas son controlados a través de un autómata (Knx), que lee la señal de los mismos y envía la orden de apertura o cierre a las ventanas (interfaz de control Fig.6.7.dcha.).

**Sistema de Ventilación Mecánica (SVM).** El SVM se ha diseñado siguiendo las instrucciones técnicas del RITE (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013) para sistemas mecánicos (Figs.6.8, 6.9 y 6.10).



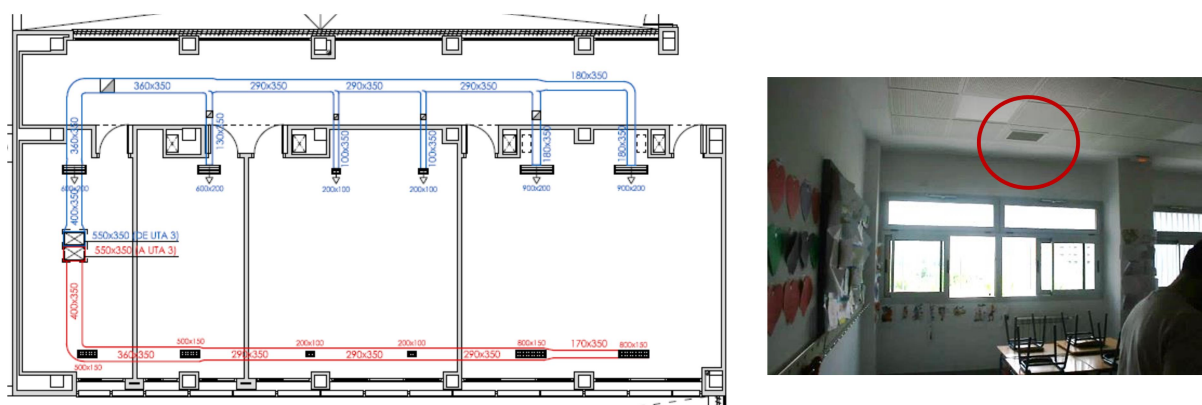
**Fig.6.8.** Imágenes del SVM en cubierta. Izda.) UTA y conductos; Dcha.) UTA (fuente: propia)

El sistema introduce aire del exterior en los espacios (aulas polivalentes, aulas de pequeño grupo y comedor) a través de Unidades de Tratamiento de Aire (UTAs) dispuestas en las cubiertas (Fig.6.9). Cuatro de ellas se localizan en la cubierta de planta baja y las dos restantes en la de planta primera.



**Fig.6.9.** Ubicación de las UTAs: arriba planta cubierta; abajo planta primera. (fuente: proyecto archivo APAE)

El aire se impulsa con un motor a través de un sistema de conductos (impulsión) y se introduce al local mediante rejillas y se extrae del local con otro motor a través de rejillas y circula por otro sistema de conductos distinto del de impulsión (extracción), llegando nuevamente a la UTA y de esta al exterior. Estos conductos discurren por el falso techo del pasillo o a través de las aulas, según el caso. Cada UTA da servicio a un conjunto de espacios físicamente colindantes en planta o en altura, quedando de este modo el edificio sectorizado. El esquema de conductos en planta se muestra en las Fig.6.10.



**Fig.6.10.** Esquema de impulsión y retorno del SVM. (izda) (fuente: proyecto archivo APAE (Junta de Andalucía, n.d.); dcha) Rejilla de retorno. (Fuente: propia)

Cada UTA se compone de varias secciones según el esquema de la Fig.6.11.

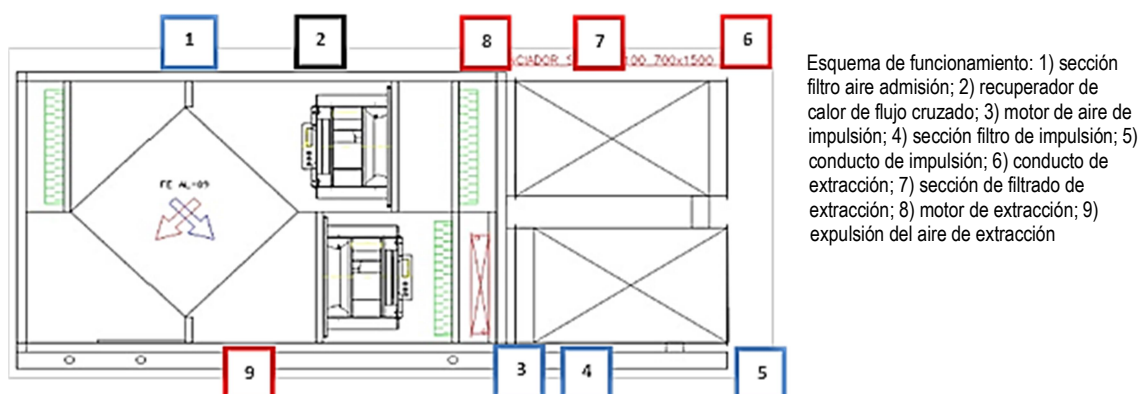


Fig.6.11. Esquema de las UTAs. (fuente: proyecto de ejecución y libro del edificio. Archivo de APAE (Junta de Andalucía, n.d.))

La finalidad de la batería de calor es introducir el aire exterior de ventilación precalentado. Para ello se utiliza un circuito de calefacción procedente de la caldera del sistema de calefacción general del edificio, específico para las UTAs. Las características de las baterías de calor se resumen en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Características de las baterías de calor (fuente: datos libro del edificio, archivo APAE)

BATERÍA DE CALOR	Salto de temperatura aire (T. Seca) (°C)	Caudal (m³/h)	Potencia (Kw)
BC UTA 1 (P40AC 1R-13T-450A-4.0pa 1C 1/2")	15,00-20,40	3061	5600
BC UTA 2 (P40AC 1R-12T-270A-4.0pa 1C 1/2")	15,00-20,41	1689	3100
BC UTA 3 (P40AC 1R-13T-450A-4.0pa 1C 1/2")	15,00-20,53	2506	4700
BC UTA 4 (P3012AC 1R-20T-1500A-4.0pa 10C 1")	15,90-21,24	10486	19000
BC UTA 5 (P3012AC 1R-20T-1500A-4.0pa 10C 1")	15,80-21,35	9561	18000
BC UTA 6 (P3012AC 1R-26T-1650A-4.0pa 13C 1 1/4")	15,90-21,47	14287	27000

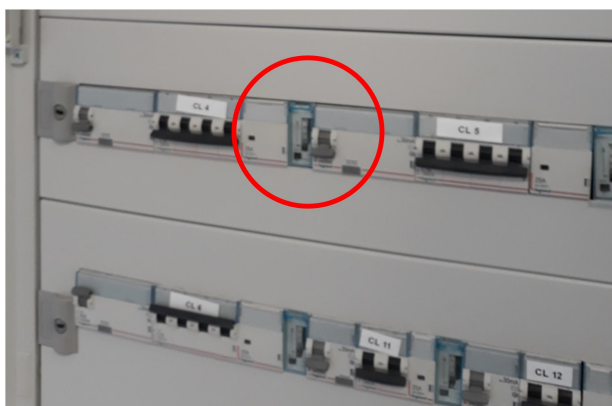
Los recuperadores de calor son de flujo cruzado. El sistema puede funcionar en modo free-cooling desactivando el recuperador mediante el accionamiento de un bypass con servomotor T/N. El bypass se activa mediante un sensor de temperatura, que manda señal para el cierre de compuertas si la temperatura del retorno es mayor que la del exterior.

Tabla 6.3. Características de los recuperadores (según datos del libro del edificio)

Recuperador de calor	Salto T invierno (°C) (T. Retorno = 22°C)	Salto T verano (°C) (T. Retorno = 25°C)	Caudal (m³/h)	Potencia recuperada (Kw)	Rendimiento (%)
RC-1	De -5 a 13,4	De 36 a 29,3	3061	19,22	68,97
RC-2	De -5 a 13,6	De 36 a 29,2	1689	9,05	70,68
RC-3	De -5 a 13,6	De 36 a 29,2	2506	15,84	69,77
RC-4	De 3,1 a 15,9	De 39,2 a 29,8	10486	45	67,1
RC-5	De 3,1 a 15,8	De 39,2 a 29,8	9561	40,7	67,20
RC-6	De 3,1 a 15,9	De 39,2 a 29,8	14287	61,3	67,80

El control del SVM es del tipo C3 (clasificación según RITE) (control temporal, según horario), con un reloj programador horario (modelo Hager EH 011) en el que se definen las horas de funcionamiento de cada UTA, ubicado en el cuadro eléctrico de planta, junto a las protecciones eléctricas magnetotérmicas y diferenciales del circuito correspondiente. El reloj tiene una batería de reserva de 200 horas.





**Fig.6.12.** Imagen de la ubicación del reloj programador en el cuadro. (fuente: propia)

Forma de programación: 1) poner en modo I; 2) mover las pestañas para programar el horario. A la derecha se activa el modo OFF (no activación). A la izquierda se activa el modo ON (funcionamiento del sistema); 3) Colocar manualmente la rueda en hora; 4) Pasar a modo AUTO para que el reloj comience a funcionar según lo programado.

## 1.2 Estimación de los consumos y emisiones de CO<sub>2</sub>

La estimación de los consumos de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas se realiza desde el enfoque del SVM, dado que el SVN1 no consume electricidad en su funcionamiento, considerándose despreciable el debido a la operación de las ventanas automáticas y las sondas. Así mismo, en el cálculo de la calefacción, la VN sólo debe considerarse como una carga más ("Monodraught: Engineering delivered. Naturally," n.d.; "Windowmaster," n.d.).

En este apartado se analizan los consumos de energía estimados asociados al funcionamiento del SVM. Este consumo se produce por dos causas: i) el funcionamiento de los motores de impulsión y retorno (consumo de electricidad) y ii) el consumo de la batería de calor cuando la temperatura exterior está por debajo de un cierto nivel (consumo de gas natural). Existe otro consumo eléctrico debido a las bombas de impulsión y recirculación que puede no considerarse como un gasto imputable al SVM, sino al sistema de calefacción, por lo que no se tiene en cuenta en esta estimación.

**Consumo de electricidad de las UTAs (energía final).** En la Tabla 6.4 se detallan los consumos debidos al funcionamiento de los motores de impulsión y de retorno de cada una de las 6 UTAs del SVM. Las horas de funcionamiento se han estimado en función al calendario y al horario escolar (181 días x5 horas diarias). Así mismo se han tenido en cuenta los datos de proyecto en relación a la potencia de los motores, caudal de aire a impulsar, etc...

**Tabla 6.4.** Estimación de consumo de los motores de las UTAS (según datos del libro del edificio)

	Nombre	N.º velocidades (1)	Potencia específica ventilador (Kw/m³/s)	Caudal (m³/h)	Caudal (m³/s)	Horas de funcionamiento	Consumo (Kwh el (2))
UTA 1	UTA 1-Imp	c/ regulador	0,857	3.061	0,85	905	659,25
	UTA 1 - Ret	c/ regulador	0,857	3.061	0,85	905	659,25
UTA 2	UTA 2 -Imp	c/ regulador	1,064	1.689	0,469	905	451,61
	UTA 2 - Ret	c/ regulador	1,064	1.689	0,469	905	451,61
UTA 3	UTA 3 -Imp	c/ regulador	0,857	2.506	0,696	905	539,81
	UTA 3 - Ret	c/ regulador	0,857	2.506	0,696	905	539,81
UTA 4	UTA 4 -Imp	c/ regulador	1,048	10.486	2,91	905	2.762,81
	UTA 4 - Ret	c/ regulador	0,759	10.486	2,91	905	2.000,93
UTA 5	UTA 5 -Imp	c/ regulador	1,041	9.561	2,66	905	2.502,23
	UTA 5 - Ret	c/ regulador	0,796	9.561	2,66	905	1.913,33
UTA 6	UTA 6 -Imp	c/ regulador	1,176	14.287	3,97	905	4.224,13
	UTA 6 - Ret	c/ regulador	1,032	14.287	3,97	905	3.706,89
<b>TOTAL</b>				<b>41.590</b>	<b>CONSUMO TOTAL (Kwh el)</b>		<b>20.411,63</b>

- (1) Cada batería de calor tiene un consumo asociado, el cual se ha calculado en base a las temperaturas exteriores en función de la época del año y el régimen horario de funcionamiento y teniendo en cuenta el ahorro que supone el recuperador de calor en el consumo. Los resultados se muestran en la Tabla 6.5
- (2) kWh el=consumo de electricidad en kWh

**Consumo de gas de las baterías de calor (energía final).** En la Tabla 6.5 se muestra la evaluación de los consumos de las baterías de calor del SVM desde un enfoque teórico y con los datos de proyecto. Se han estimado

temperaturas de retorno de 22°C. Al igual que para la estimación de los consumos eléctricos, se han considerado el calendario y el horario escolar típico.

**Tabla 6.5.** Estimación del consumo de gas natural anual de las baterías de calor

CONSUMO (Kwh)	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	TOTAL
UTA 1	1,38	46,74	229,90	209,49	302,17	288,40	262,41	89,49	25,71	0,00	1.455,69
UTA 2	0,74	24,93	122,63	111,74	161,18	153,83	139,97	47,73	13,71	0,00	776,45
UTA 3	1,13	38,27	188,22	171,50	247,38	236,11	214,83	73,26	21,05	0,00	1.191,76
UTA 4	5,21	176,14	866,34	789,39	1.138,66	1.086,75	988,83	337,22	96,88	0,00	5.485,41
UTA 5	4,75	160,60	789,92	719,76	1.038,22	990,88	901,60	307,47	88,33	0,00	5.001,53
UTA 6	6,89	232,72	1.144,60	1.042,94	1.504,39	1.435,80	1.306,43	445,53	127,99	0,00	7.247,31
<b>CONSUMO TOTAL BATERÍAS DE CALOR (Kwh)</b>											<b>21.158,15</b>

\*Estimación realizada según las temperaturas medias mensuales durante cada hora lectiva, teniendo en cuenta el caudal de cada UTA y el paso del aire exterior por el recuperador y la eficiencia del mismo, así como una temperatura de retorno de 22°C

### 1.2.1 Consumo de energía primaria y emisiones de CO<sub>2</sub>

En base a los resultados anteriores, el consumo de energía total anual que se estima, debido sólo al funcionamiento de las UTAs, teniendo en cuenta el de electricidad de los ventiladores y el de las baterías de calor, es de 41.569,78 kWh de energía final, lo cual supone 75.517,02 kWh de energía primaria y 26.414,54 kg de CO<sub>2</sub> emitido (aplicando los coeficientes de conversión de la Tabla 5.27 del Capítulo 5). Por tanto, en 30 años, utilizando el SVNI podrían ahorrarse las cantidades 1.247.100 kWh de energía final, 2.265.510 kWh de energía primaria y reducirse la emisión de 792.450 kg de CO<sub>2</sub>.

### 1.2.2 Costes de los sistemas y emisiones asociadas

El coste asociado a los distintos sistemas de ventilación presenta varios enfoques: i) inversión inicial; ii) costes de funcionamiento; iii) costes de mantenimiento.

**Inversión inicial.** El coste de los sistemas de ventilación se refleja en la Tabla 6.1. La inversión total de construcción del edificio completo ha sido de 4.464.839,49 €.

El coste de la instalación del SVM ha sido de 233.257,51 € lo cual supone un porcentaje del 5,29% sobre el total de la inversión. A esta cantidad hay que añadir el coste del centro de transformación necesario por el incremento de potencia eléctrica necesario debido a la demanda y el consumo de electricidad de esta instalación.

El coste del SVNI ascendió a la cantidad de 59.515,76 €, suponiendo el 1,33% del coste total del centro educativo. Este incluye el autómata, las sondas, chimeneas y aireadores y la automatización de las ventanas. De estos datos se desprende que el coste del SVM es casi 4 veces superior al del SVNI diseñado según los parámetros definidos en este documento para garantizar las mismas prestaciones de CAI en el aula.

**Costes de funcionamiento.** Los costes de funcionamiento se pormenorizan para el SVM. Estos se estimaron, junto con los consumos asociados, en el Capítulo 4 (Tabla 4.9). Así mismo, se calculó también el coste asociado al funcionamiento de esta instalación aplicando los valores de Costes de la energía de la Tabla 4.10 (Capítulo 4), resultando ser del entorno de 3.350 € anuales. A lo largo de la vida útil de la instalación, si se consideran 30 años, y sin tener en cuenta el incremento del precio de los combustibles, el coste debido al funcionamiento de esta instalación es de 100.500 €.

**Costes de mantenimiento.** Este factor no se encuentra cuantificado en el proyecto del edificio. Según el proyecto Academia (Grupo TEP 130, n.d.), el mantenimiento y la revisión de filtros, conductos y demás elementos del sistema es necesario realizarlo 3 veces al año, estimando el coste anual de mantenimiento del SVM entre los 1.620 € y los

2.880 €. Si, en base a esto, se considera un valor promedio de 2.250 €, el coste del mantenimiento sólo de este SVM será de 67.500 € en 30 años.

### 1.3 Análisis de los datos y discusión

En relación a los datos recogidos en este apartado, los más significativos están relacionados con el consumo de energía y el coste de la instalación de VM a lo largo de la vida útil del edificio, tal como se resume a continuación.

**Consumo de energía.** En la Tabla 4.9 (del Capítulo 4) se observaba cómo el ratio de consumo de los SVM se encuentra en valores entre los 5,22 y los 16,89 kWh/m<sup>2</sup> y año (con un promedio de 11,05 kWh/m<sup>2</sup> año). En el caso concreto de este edificio, el consumo asociado al funcionamiento del SVM es de 9,53 kWh/m<sup>2</sup> año. Si comparamos este valor con el consumo estimado para un edificio tipo (según el análisis del Capítulo 5), que se cuantificaba en 30 kWh/m<sup>2</sup>, se estaría incrementando el consumo energético en más de un 30% sobre el estándar, sólo debido al funcionamiento de esta instalación, alejándose por tanto del objetivo marcado por el proyecto Zemeds (*NZEB renovation for Mediterranean schools*, n.d.) de una demanda de 25 kWh/m<sup>2</sup> año para edificios escolares de consumo casi nulo en el ámbito mediterráneo.

Como ya se ha comentado, en el caso de la VN, esta debe ser tomada en cuenta como una carga más en el consumo de energía, (Windowmaster <5°C (“Windowmaster,” n.d.) (Fig.5.32) ; Monodraught (“Monodraught: Engineering delivered. Naturally,” n.d.) (Fig.1.58)). Según los valores medios mensuales de las temperaturas exteriores analizados en la Fig.4.21 (Capítulo 4), sólo en la zona D3 la temperatura exterior en el periodo de ocupación del edificio escolar baja de los 5°C a las 8 de la mañana. Suponiendo que este consumo debido a la actuación del SVN sin recuperador de calor fuera equivalente al de la batería de calor de las UTAs (aunque el efecto de la carga interior y la inercia térmica de la edificación pueda introducir algún factor corrector), aún habría un sobreconsumo de energía del SVM sobre el SVN debido al funcionamiento de los motores eléctricos de las UTAs, además del mencionado coste de mantenimiento.

**Coste a lo largo de la vida útil.** A lo largo de la vida útil del edificio (30 años), el coste total de una instalación de VM será de 401.260 euros (Costes Inversión inicial + mantenimiento y funcionamiento).

## 2.- Validación. Campaña de medidas en el edificio test (Plan experimental 2ª parte)

### Resumen

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de las medidas realizadas en el edificio test descrito en el apartado anterior. En este se incluía un SVM y un SVNI con un doble objetivo: el análisis comparativo de ambos, y la validación de funcionamiento y operatividad del SVNI para ser utilizado como solución estándar en las aulas de los edificios escolares con la finalidad de garantizar la CAI durante el tiempo lectivo. Se realizan medidas “in situ” de CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad, así como de concentración de aldehídos y orgánicos volátiles identificados por compuestos y analizados en laboratorio. Cabe señalar que el edificio se encuentra en fase de garantía hasta 2020-2021, por lo que actualmente las medidas están sirviendo también para el ajuste del propio sistema y la corrección de las eventualidades propias de este periodo que se puedan apreciar.

### 2.- Validación. Campaña de medidas en el edificio test (Plan experimental 2ª parte)

2.1	Campaña de medidas.....	270
2.1.1	Metodología .....	270
2.2	Resultados.....	276
2.3	Análisis y discusión.....	286

## 2.1 Campaña de medidas

Vistos los resultados de CAI obtenidos en las medidas del Capítulo 5, se diseña una campaña en el edificio test para estudiar comparativamente el funcionamiento de los dos sistemas de ventilación incluidos en el mismo y analizar la CAI de los espacios de uso docente. Con estas medidas se pretende calibrar la operación de las sondas y el autómata que gestiona el SVNI del edificio, calificar la CAI de las aulas y validar la operación del SVNI en comparación con el SVM. Para ello, se seleccionan distintas aulas en las que se acciona el funcionamiento de uno u otro sistema con ensayos diseñados de manera preconfigurada. Considerándose el CO<sub>2</sub> como principal indicador de la calidad del aire, en base a la información recopilada en el Estado del Arte y a los resultados obtenidos en el Capítulo 5, se toman medidas de CO<sub>2</sub> con diferentes equipos para analizar la evolución de sus niveles de concentración en el interior de las aulas. Junto con esto se toman también datos de temperatura y humedad. Adicionalmente se realizan medidas pasivas de aldehídos y COV para confirmar la no emisividad de los materiales empleados y calificar la CAI del edificio, observándose los resultados en relación a las conclusiones alcanzadas en el Capítulo 5. En estas campañas de medida anteriores se identificó un muy bajo nivel de COV y en consecuencia una adecuada CAI en cuanto a estos compuestos en las escuelas andaluzas. Este aspecto se relaciona directamente con la forma de construcción y el tipo de material empleado, por lo que de esta circunstancia se deriva la necesidad de controlar la única emisión que se produce en el interior del aula, que es el CO<sub>2</sub> debido a la actividad metabólica de los ocupantes. Como último objetivo se pretende identificar qué medidas de mejora pueden implementarse en el sistema estándar diseñado.

### 2.1.1 Metodología

La metodología llevada a cabo para definir la campaña de medidas se estructura en los siguientes pasos: i) análisis previo de las rutinas del centro escolar; ii) Identificación de los parámetros a analizar y niveles de referencia así como de los equipos de medida; iii) Diseño de la campaña de medidas (incluyendo la selección de las aulas a ensayar); iv) Toma de datos.

- i. **Análisis previo de las rutinas del centro escolar.** para una mejor definición y adecuación de la campaña de medidas y de la toma de datos y una mejor comprensión de los datos que se obtienen de la campaña de medidas, se estudian las rutinas específicas del centro escolar.

Las clases se desarrollan según el calendario escolar, de lunes a viernes no festivos en horario de mañana de las 9:00 a las 14:00 horas. La jornada lectiva se estructura en 6 unidades didácticas de 45 minutos de duración con dos pausas, una pausa breve en la que permanecen en la propia aula y un recreo intermedio en el que abandonan el aula para ir al patio. Entre las diferentes asignaturas que se desarrollan, algunas de ellas requieren el cambio de aula, como es la clase de educación física, música o plástica. Los niños que entran antes de la jornada lectiva, porque participan en el aula matinal (uno de los planes existentes para conciliar la vida laboral y familiar), son alojados en el comedor, donde comparten el espacio todos los niveles educativos, atendidos por sus monitoras. Las tareas de limpieza se realizan inmediatamente después del fin de la actividad escolar, esto es desde las 14:30 aproximadamente hasta las 16:00 horas.

Consultado el personal del centro, mantienen costumbres higiénicas de ventilación del aula, independientemente de que haya un sistema de ventilación o no, abriendo las ventanas correderas del nivel inferior en el recreo y en los intermedios de clase. De hecho, manifiestan la contrariedad que les supone la apertura automática de las ventanas, reclamando la opción de poder actuarlas ellos a voluntad, en función de su percepción de lo cargado que se encuentre el ambiente. En cuanto al SVM, desconocen su funcionamiento y consideran que no lo necesitan. Sí solicitan la posibilidad de tener aire acondicionado, con preferencia en las aulas de planta primera con orientación sur.

- ii. **Identificación de los parámetros a analizar y los niveles de referencia.** Se seleccionan los parámetros a analizar identificados en los capítulos anteriores (Capítulo 4 y Capítulo 5), centrándonos en los relativos a los contaminantes, para la caracterización del caso, según recomienda la UNE EN 13779 y en los niveles de concentración de CO<sub>2</sub>. Siendo los que se recogen en la Tabla 6.6.

**Tabla 6.6.** Valores de referencia para caracterizar la CAI del caso de estudio. A. contaminantes químicos; B. niveles de CO<sub>2</sub> como indicador de la CAI

	Contaminante	Unidad	Límite	Guía
	COVt	µg/m <sup>3</sup>	<600 (promedio durante ocupación)	Legislación portuguesa (Decreto-Lei n.º 78, 2006; Decreto-Lei n.º 79, 2006; Portaria n.º 353-A, 2013)
<b>A.</b>	Benzeno	µg/m <sup>3</sup>	<1,7 (exposición prolongada)	Mandin Et al. OMS (Mandin et al., 2009) (WHO, 2010)
	Trichloroethylene	µg/m <sup>3</sup>	<20 (exposición prolongada)	Norma francesa ANSES 2011[63,64]
	Tolueno	µg/m <sup>3</sup>	<250 (máxima referencia)	Legislación portuguesa (Portatia n.º 353-A, 2013)
	Tetrachloroethylene	µg/m <sup>3</sup>	<250 (máxima referencia)	Legislación portuguesa (Portatia n.º 353-A, 2013)
	Ethylbenzeno	µg/m <sup>3</sup>	<850	UE- valores LCI (European Commission, 2016)
	o+m+p-xylene	µg/m <sup>3</sup>	<500	UE- valores LCI (European Commission, 2016)
	Styreno	µg/m <sup>3</sup>	<30 (máxima referencia)	Norma alemana (Umweltbundesamt, 2018)
	Alpha-pineno	µg/m <sup>3</sup>	<200	Norma alemana (Umweltbundesamt, 2018)
	1,4-dichlorobenzeno	µg/m <sup>3</sup>	<150	UE- valores LCI (European Commission, 2016)
	Formaldehydo	µg/m <sup>3</sup>	<50 (exposición de 2 horas)	Norma francesa ANSES2011 (ANSES, n.d., 2011; Mandin et al., 2009)
	Acetaldehydo	µg/m <sup>3</sup>	<160 (exposición > 1 año)	Norma francesa ANSES 2014 (ANSES, n.d., 2014)
	Acrolein	µg/m <sup>3</sup>	<0,8	Norma francesa, ANSES 2011 (ANSES, n.d., 2011), Ramalho et al (Ramalho et al., 2015)
	Propanal	µg/m <sup>3</sup>	no guideline	-
	Butanal	µg/m <sup>3</sup>	<650	UE- valores LCI (European Commission, 2016)
	Benzaldehydo	µg/m <sup>3</sup>	<20	Norma alemana (Umweltbundesamt, 2018)
<b>B.</b>	CO <sub>2</sub>	Unidad	Límite	Tiempo de exposición y observación
	SVN	ppm	<1500	Media de concentración durante el periodo de ocupación (Department for Education and skills, 2006; EFA, 2016)
			<1000	Nivel de concentración durante la ocupación (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013)
	SVM	ppm	<1000	Media de concentración durante el periodo de ocupación (EFA, 2016)
			<1000	Nivel de concentración durante la ocupación (Ministerio de la Presidencia & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, 2013)

**Equipos de medida y toma de muestras.** Para la toma de datos en este caso de estudio se han empleado: i) equipos de medida y ii) toma de muestras.

i) Equipos de medida. Se han utilizado los equipos fijos del edificio (Tabla 6.7) y equipos portátiles para calibración y validación de los resultados (Tabla 6.8).

**Tabla 6.7.** Sensores individuales de medida en continuo y KNX del edificio test (equipo fijos)

Equipo	Intervalo de medida	Variables	Rango de medida
<b>Sensor de techo Sewi KNX AQS/TH-D.</b> Configuración Software ETC de KNX (Elsner elektronik)	2/5 minutos	Temperatura / humedad relativa/ Presión/ CO <sub>2</sub>	-10...+50°C max. 95% RH 0-2000ppm
<b>HomeLYnk</b> Logic controller (servidor web Schneider Electric) 24 v Con aplicación de visualización web en diferentes plataformas (PC, Tablet, Smartphone)			

**Tabla 6.8.** Equipos portátiles de medida en continuo

Equipo	Intervalo de medida	Variables	Rango de medida
<b>Delta OHM HD 21ABE17</b>	2 minutos	CO <sub>2</sub> dióxido de carbono (ppm)	0...5000 ppm
		CO monóxido de carbono (ppm)	0...500 ppm
		Presión atmosférica (Pa)	750...1100 hPa
		Humedad relativa (%)	0...100 % RH
		Temperatura (°C)	-20...+60 °C
<b>Optical Particle Sizer OPS 3330</b>	2 minutos	Número y tamaño de partículas (en 10 canales de medida)	0.3 – 10 µm
<b>TVOC 103</b>	2 minutos	TVOC (ppb)	5 a 20,000 ppb



En la Fig.6.13 se muestran imágenes de los equipos y del interfaz de diálogo del Knx.

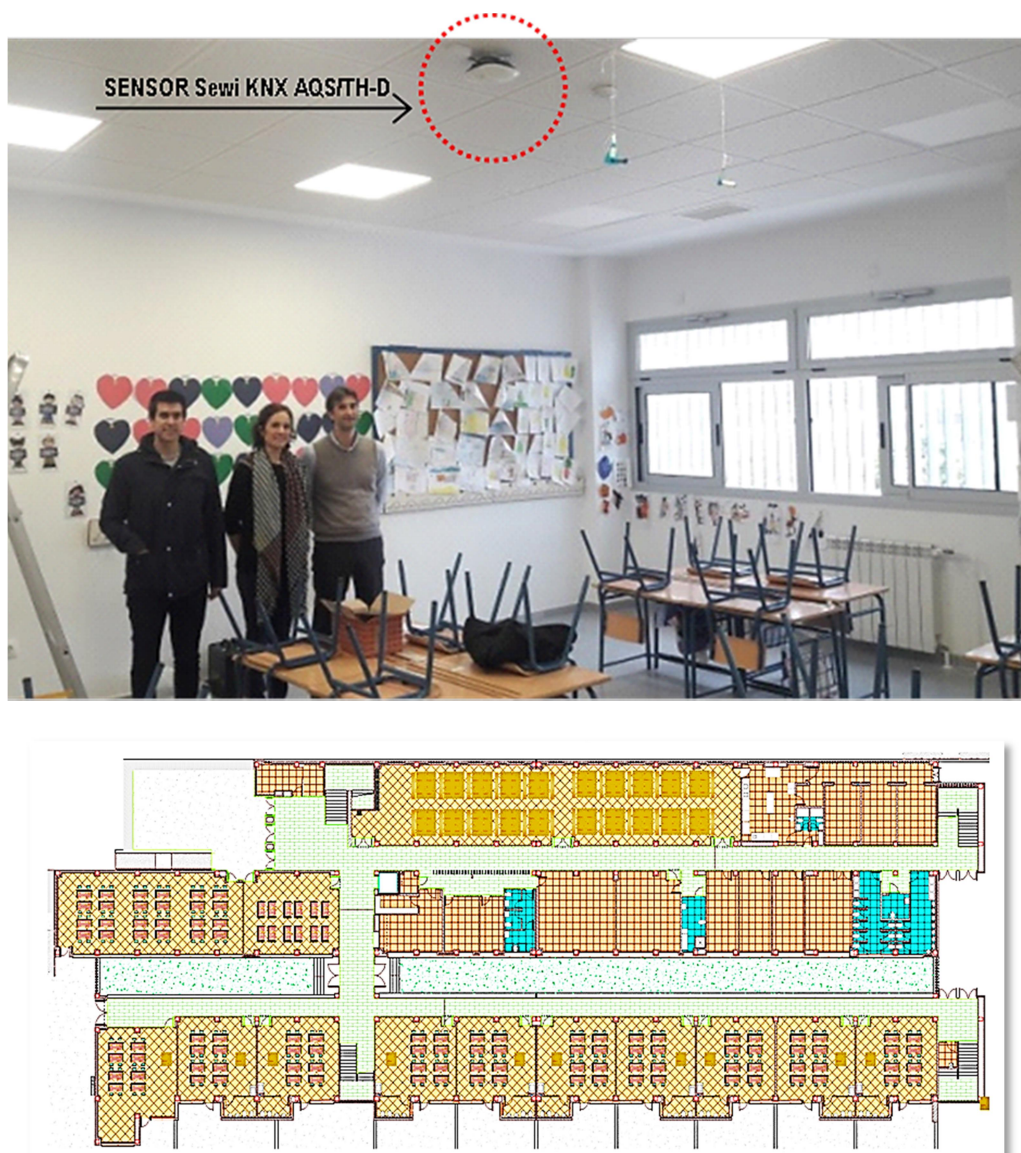


Fig.6.13. Equipos de medida fijo. Superior) Sensor fijo en aula “Sewi”. Inferior) Interfaz diálogo Knx

i) Toma de muestras de medidas pasivas y ensayos de laboratorio. Se han utilizado dispositivos tipo passive samplers para conocer los niveles ambientales de compuestos orgánicos volátiles y formaldehidos, analizados posteriormente en laboratorio (laboratorio ICSM, utilizando cartuchos de Sigma-Aldrich).

Tabla 6.9. Características de los dispositivos de toma de medidas pasivas (passive samplers)

Equipo	Intervalo de muestreo	Compuestos	Método de análisis
VOC adsorbent cartridges (Radial passive sampler RAD145)	5 días (muestreo difusivo)	Benzene, Trichloroethylene, Toluene, Tetrachloroethylene, Ethylbenzene, m+p-xylene, Styrene, o-xylene, Alpha-pinene, 1,4-dichlorobenzene	Thermal desorption HRGC-MS
Aldehyde adsorbent cartridges (Radial passive sampler RAD165)	5 días (muestreo difusivo)	Formaldehyde, Acetaldehyde, Acrolein, Propanal, Butanal, Benzaldehyde, Isopentanal, Pentanal, Hexanal	Solvent extraction (acetonitrile) HPLC-UV

HRGC: cromatografía de gases de alta resolución. MS: espectrometría de masas. HPLC: cromatografía líquida de alto rendimiento. UV: ultravioleta.



**Fig.6.14.** Imágenes de la disposición de los equipos de medida. Superior) Radial passive sampler (medidas pasivas); Inferior) Delta Ohm en el aula

- iii. **Diseño de la campaña de medidas.** La campaña de medidas se estructura en tres etapas: i) ETAPA 1: medidas de calibración; ii) ETAPA 2: medidas de la CAI y los contaminantes (cualitativas y cuantitativas) y iii) ETAPA 3: medidas de validación.

En primer lugar (ETAPA 1) se realiza la calibración del sistema de SVNI contrastando las medidas tomadas y evaluadas por las sondas controladas por el autómata con equipos portátiles. Posteriormente, en época fría (por considerarse más desfavorable) (ETAPA 2), se lleva a cabo la evaluación de la CAI de las aulas analizando cualitativa y cuantitativamente el tipo y nivel de contaminantes, con medidores pasivos “passive samplers” ensayados posteriormente en laboratorio. Se estudia también el funcionamiento de las ventanas automáticas junto con el análisis de la ocupación y de los niveles de CO<sub>2</sub> y se toman medidas de temperatura y humedad interiores. Por último las medidas de validación se llevan a cabo en un día de época intermedia (ETAPA 3). El resumen de las medidas llevadas a cabo en las 3 etapas y las aulas seleccionadas se recoge en la Tabla 6.7.

**Tabla 6.10.** Identificación de las aulas ensayadas, sistema de ventilación y equipo de ensayo en cada etapa del plan de medidas

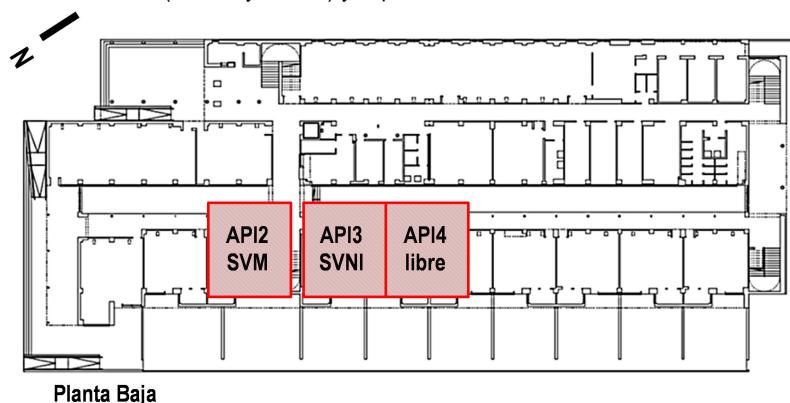
AULA ENSAYADA	API2	API3	API4	APP1	APP2	APP3	APP4	APP5	APP6
<b>ETAPA 1</b> (Mayo 2018)	X	X	X						
	SVM	SVNI	LIBRE						
		Knx	Knx						
Equipos/medidas	Knx	Delta Ohm 89	Delta Ohm 78						
<b>ETAPA 2</b> (Diciembre 2018)				X	X	X	X	X	X
				LIBRE	LIBRE	SVNI	SVNI	SVNI	SVNI
				Ps	Ps	Ps	Ps	Ps	Ps
				Knx	Knx	Knx	Knx	Knx	Knx
Equipos/medidas				Delta Ohm		Delta Ohm			
<b>ETAPA 3</b> (Abril 2019)	X	X	X	X		X		X	
	SVNI	SVNI	SVNI	SVNI		SVNI		SVNI	
Equipos/medidas									

Tipos de sistemas de ventilación utilizados en cada aula durante el ensayo: SVM (ventilación mecánica); SVNI (ventilación natural inteligente); LIBRE (los dos sistemas desactivados, y la ventilación al libre criterio del usuario. Rango de apertura de las ventanas automáticas del SVNI 1000-1400 ppm.

Equipos de medida: Sensor Sewi-Knx (Tabla 6.7); Delta Ohm (Tabla 6.8); PS passive samplers (Tabla 6.9)

**ETAPA 1. Calibración del sistema.** Se miden las condiciones con los equipos portátiles Delta Ohm a la vez que con las propias sondas del SVNI (sensores “Sewi” gestionados por el autómata Knx). Los resultados de estas últimas se obtienen a través del autómata (sistema Knx). Según el manual de funcionamiento, estas se “autocalibran” cada 2 semanas en función de los resultados que hayan medido. A su vez, los Delta Ohm miden hasta 5000 ppm, mientras que el autómata hasta los 2000 ppm. Los resultados obtenidos con los equipos portátiles Delta Ohm sirven tanto para calibrar la medición de las sondas fijas como para evaluar las concentraciones máximas que se alcanzan.

Los ensayos se realizan durante una semana lectiva de mayo 2018. Se toman datos en continuo de CO<sub>2</sub>, temperatura interior y humedad relativa. Se analizan comparativamente 3 aulas de educación infantil de manera simultánea, con 3 tipos de medidas de ventilación: i) Con SVM; ii) Con SVNI y iii) Sin ventilación programada (libre), dejándolo a la libre decisión del usuario, según se representa en la Fig.6.15. El grado de ocupación de cada aula es de 25 alumnos (entre 3 y 6 años) y el profesor



**Fig.6.15.** Etapa 1.- Identificación de las aulas de medida seleccionadas para la etapa 1 de calibración previa (planta baja). (fuente: propia)

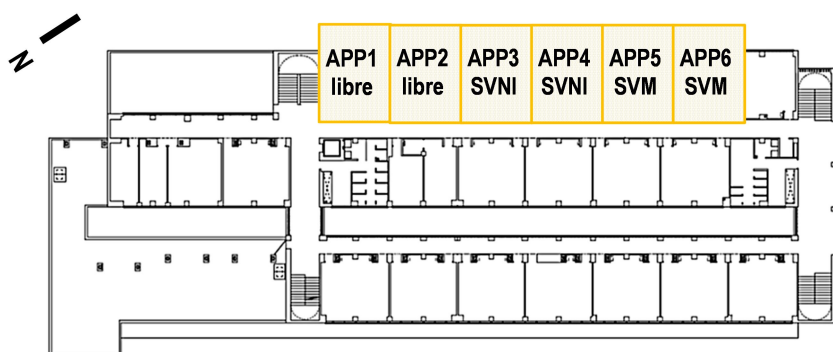
**ETAPA 2. Evaluación de la CAI (medida de contaminantes).** Se realiza la evaluación (cuantitativa y cualitativa) de la CAI mediante la toma de medidas pasivas de los niveles de COV y aldehídos. Se miden también los niveles de CO<sub>2</sub> como indicador de la CAI y de temperatura y humedad relativa interiores.

Los ensayos se desarrollan en la semana del 11-17 diciembre, por ser más desfavorable, ya que el usuario en época fría realiza menos actuaciones de ventilación intencionada con las ventanas correderas, por lo que el sistema de ventilación será preferente en la aportación de resultados. En dos aulas (APP1 (libre) y APP3 (SVNI), se disponen también los equipos portátiles Delta Ohm como medida de contraste.

Las aulas ensayadas son diferentes a las analizadas en la Etapa 1 y se han seleccionado con el objetivo de obtener la mayor diversidad de información posible. Dado el grado de ocupación parcial del edificio, se seleccionan aulas



que sí tienen grupos asignados. Se ubican en la zona de primaria (planta alta). Se analizan comparativamente 3 aulas en simultáneo, con 3 tipos de medidas de ventilación: i) Con SVM; ii) Con SVNI y iii) Sin ventilación programada (libre). El grado de ocupación de cada aula es de 25 alumnos (entre 6 y 12 años) y el profesor. Se muestran en la Fig.6.16.

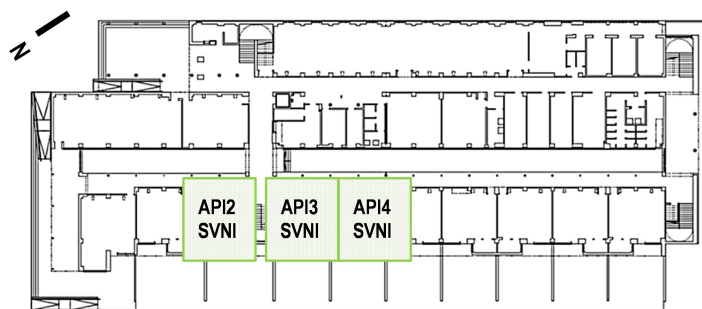


**Fig.6.16.** Etapa 2.- Identificación de las aulas de medida seleccionadas para la Etapa 2 de análisis de la CAI (planta alta). (fuente: propia)

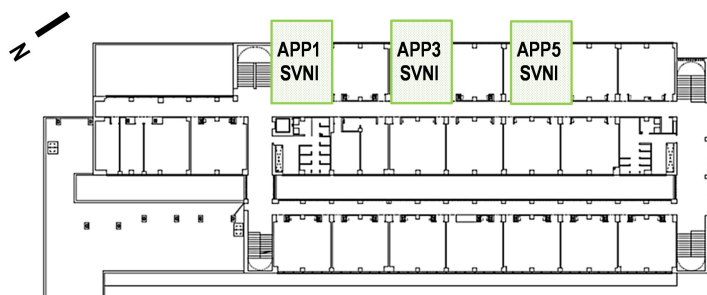
**Planta Alta**

Se analizan las aulas de primaria 1-6, dos a dos: i) Aulas APP1-APP2 con los dos sistemas de ventilación desactivados, sin ventilación programada (libre), dejándolo a la libre decisión del usuario); ii) APP 3-APP4 con SVNI; iii) Aulas APP5-APP6 con SVM. Los “passive samplers” se ubican en las aulas 1, 3 y 6 (miden del día 11 a las 14:00 horas al 17 a las 12:00 horas). En todos los espacios se toman datos de los sensores “Sewi” gestionados por el automático Knx, (del día 11 al 17). En las aulas 1 y la 3 se disponen también los equipos portátiles Delta Ohm como medida de contraste durante los días 12 al 17..

**ETAPA 3. Medidas de validación.** En la última etapa se realizan, en el mes de abril de 2019, pruebas controladas de apertura de las ventanas del SVNI, siguiendo pautas basadas en la estructura de funcionamiento diario. Se aplica la recomendación de la OMS según la cual las estrategias de ventilación deben ser pautadas e integrarse en el normal desarrollo diario de la actividad académica. Se estudian 3 aulas de infantil y 3 aulas de primaria de las ensayadas en las dos primeras etapas, tal como se muestra en el la Fig.6.17.



**Planta Baja**

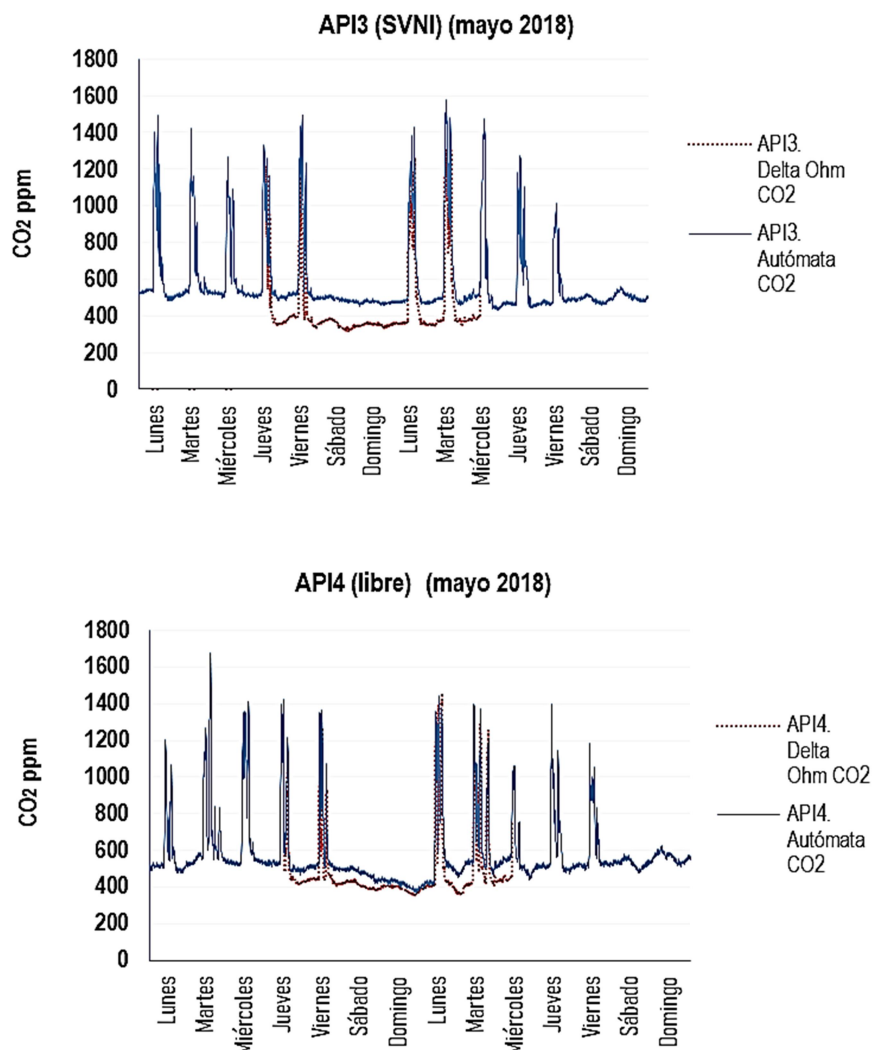


**Planta Alta**

**Fig.6.17.** Etapa 3.- Identificación de las aulas de medida seleccionadas para la Etapa 3 de validación. (fuente: propia)

## 2.2 Resultados

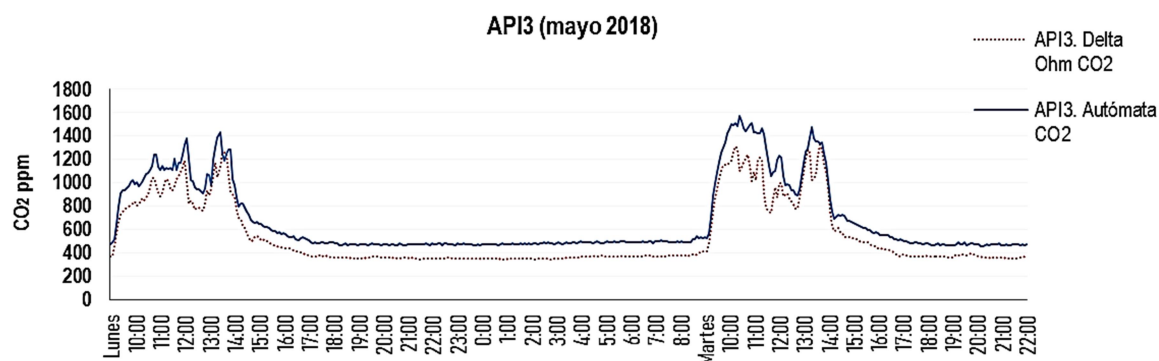
**ETAPA 1. Calibración del sistema.** La calibración de los equipos se realizaron disponiendo medidores en continuo (Delta Ohm) en las aulas con SVNI y con ventilación libre (con ambos sistemas SVNI y SVM desactivados). El resultado se muestra en forma de gráfica en la Fig. 6.18.



**Fig.6.18.** Calibración de las sondas fijas del edificio (sensor Sewi-Knx con los equipos portátiles Delta Ohm). Superior) API3; Inferior) API4 (fuente: propia)

En las gráficas de la Fig.6.18 se representan los valores interiores de CO<sub>2</sub> medidos a lo largo de dos semanas en las aulas de educación infantil API3 (Fig.6.18 superior) y API4 (Fig.6.18 Inferior), de concentración de CO<sub>2</sub> con los sensores Sewi del edificio (de cada aula) y con los medidores portátiles Delta Ohm. En el eje "x" se representan los días de la semana y en el eje "y" los valores de concentración de CO<sub>2</sub> (toma de datos cada 5 minutos). El análisis comparativo de las medidas de ambos dispositivos permite calibrar el funcionamiento del sistema fijo del edificio.

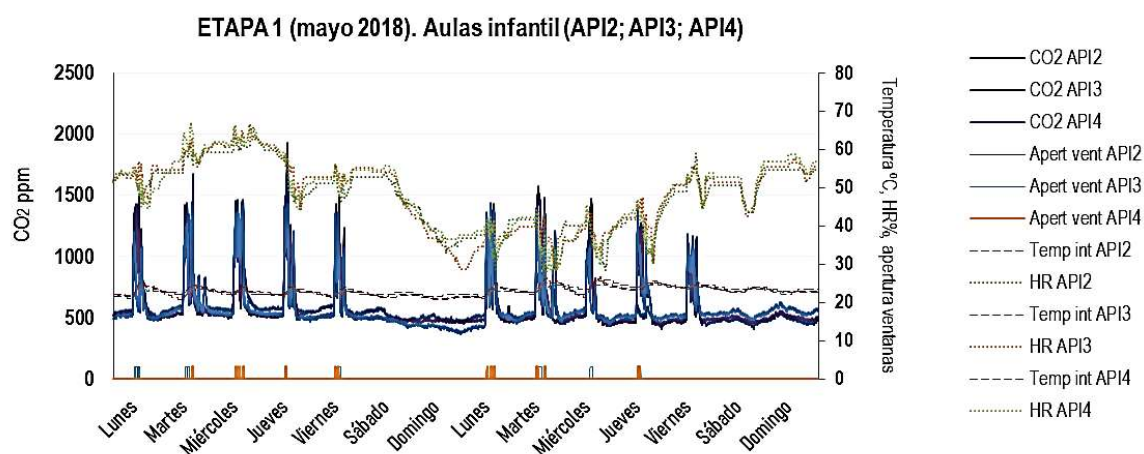
En la gráfica de la Fig.6.19 se detallan los valores medidos por ambos dispositivos por horas en el aula API3 durante dos días.



**Fig.6.19.** Calibración de las sondas fijas del edificio (sensor Sewi-Knx con los equipos portátiles Delta Ohm). Detalle de 2 días por horas en el aula API3. (fuente: propia)

En la gráfica de la Fig.6.19 se representan los valores de concentración de CO<sub>2</sub> medidos por el sensor Sewi del aula (línea de puntos) y por el equipo portátil Delta Ohm (línea continua). En el eje “x” se identifica cada hora y en el eje “y” se representa el nivel de CO<sub>2</sub> alcanzado (en ppm). Las medidas se tomaron cada 5 minutos.

Los valores obtenidos por los sensores fijos del edificio (Sewi) registrados por el Knx para el conjunto de aulas de ensayo de la Etapa 1 se representan en la Fig.6.20.

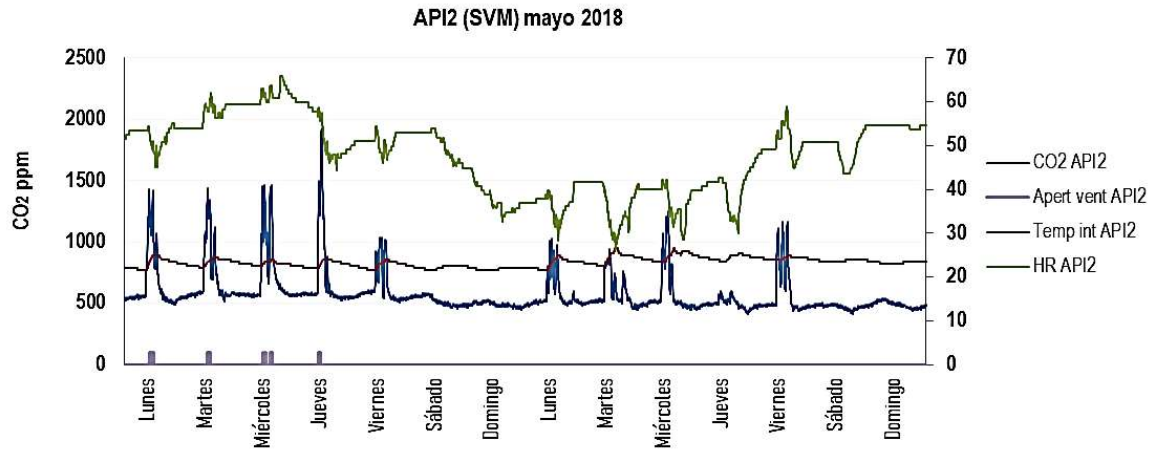


**Fig.6.20.** Resultados medidos por los sensores Sewi fijos del edificio y grabados por el KNX de una semana de mayo de 2018 en 3 aulas de educación infantil. (fuente: propia)

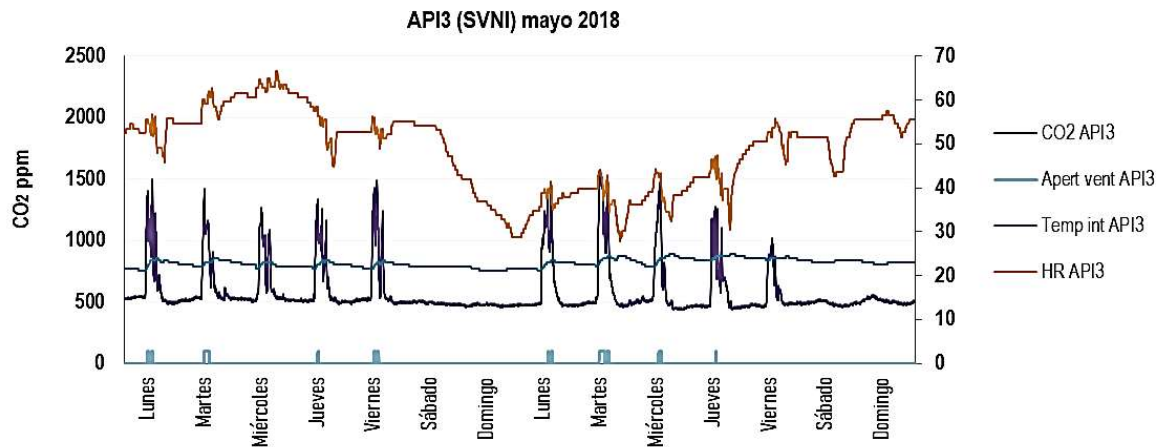
En la gráfica de la Fig.6.20 se representan los valores interiores de concentración de CO<sub>2</sub>, temperatura y HR obtenidos con los sensores Sewi del edificio (de cada aula). En el eje “x” se representan los días de la semana y en el eje “y” (izquierda) los valores de concentración de CO<sub>2</sub>. En el eje “y” (derecha) se representan los valores de temperatura interior (°C), humedad relativa (%) y apertura de ventanas automáticas. La toma de datos se realiza cada 5 minutos.

Los valores interiores de temperatura (°C), HR (%) y concentración de CO<sub>2</sub> (ppm) obtenidos por el sensor Sewi de cada aula (API2 con SVM; API3 con SVNI y API4 con ventilación libre) se representan en las gráficas de las Figs.6.21 a 6.23.

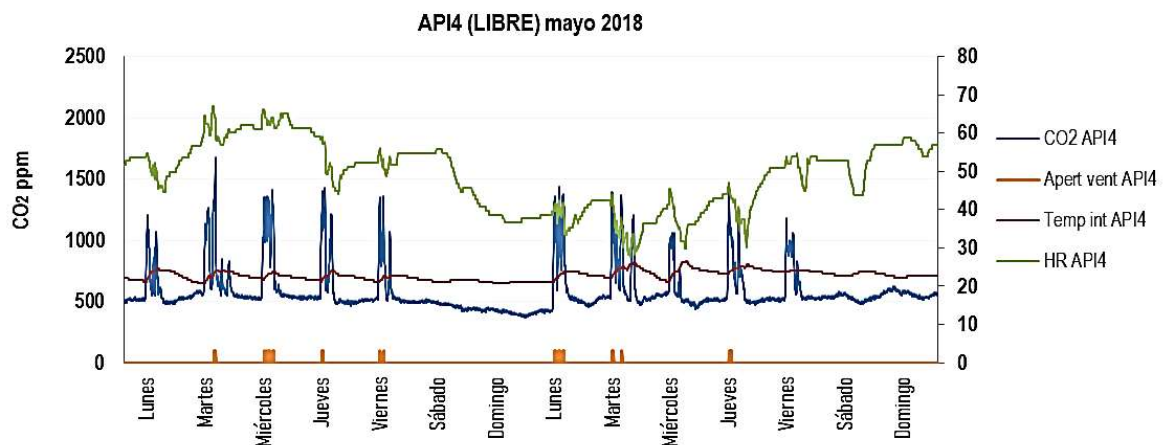




**Fig.6.21.** Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX de una semana de mayo en el aula API2 de educación infantil (SVM). (fuente: propia)

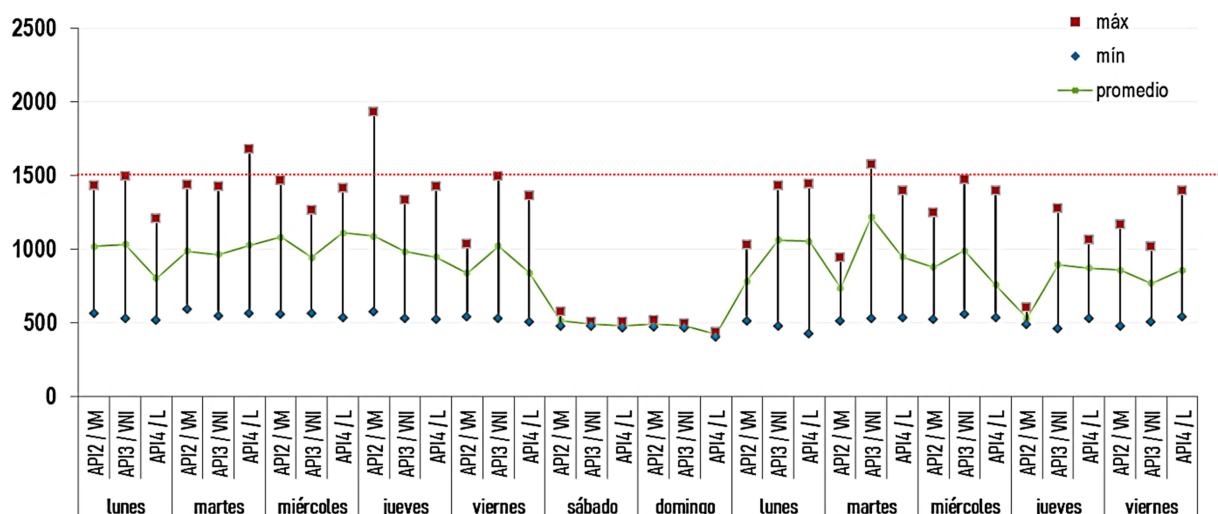


**Fig.6.22.** Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX de una semana de mayo en el aula API3 de educación infantil (SVNI). (fuente: propia)



**Fig.6.23.** Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX de una semana de mayo en el aula API4 de educación infantil (funcionamiento libre del usuario). (fuente: propia)

Por último, en la gráfica de la Fig.6.24 se representan los valores máximos, mínimos y los promedios obtenidos durante el periodo ocupado de cada día para cada aula.



**Fig.6.24.** Valores máximos, mínimos y promedios diarios en base a los resultados medidos por las sondas y grabados por el KNX de una semana de mayo de 2018 en 3 aulas de educación infantil. (fuente: propia)

En la Fig.6.24 se representan los valores máximos, mínimos y los promedios calculados durante el periodo ocupado, para poder comparar con el límite de referencia definido en la Tabla 6.6.B. En el eje "x" se identifican los días de la semana y el aula de ensayo (API2, API3 ó API4). En el eje "y" se indican los niveles interiores de CO<sub>2</sub> en ppm (valor máximo, mínimo y promedio calculado), durante el periodo de ocupación del aula (de 9:00 a 14:00 horas), que corresponde con la jornada lectiva del centro.

**ETAPA 2. Evaluación de la CAI (medida de contaminantes).** Se tomaron medidas pasivas de COVs y aldehídos en las aulas de primaria durante una semana de diciembre (11-17 de diciembre), representativos de la temporada fría, se realizó además un seguimiento de la actividad de las aulas ensayadas. En esta etapa el sistema de calefacción se encuentra en funcionamiento.

Los resultados obtenidos en el ensayo de laboratorio se recogen en las Tablas 6.11 y 6.12, desglosados por componentes y agrupados por tipologías (Tabla 6.11 aldehídos y Tabla 6.12 COVs). Se indican los valores medidos en cada una de las aulas, así como los valores promedio calculados para el conjunto de la muestra. En las tablas se recogen también los valores límite de referencia expuestos en la Tabla 6.6.A.

**Tabla 6.11.** Resultados medidas pasivas Aldehídos

	Formaldehído	Acetic aldehído	Acrolein	Propanal	Butanal	Benzaldehído	Isopentanal	Pentanal	Hexanal
límite según guías	<50	<160	<0,8	no limite	<650	<20	no limite	<800	<900
APP 1	5,5	3,0	< 0,1	1,4	6,0	0,5	0,6	1,6	5,4
APP 3	5,8	3,2	< 0,1	1,4	5,7	0,5	0,6	1,7	6,4
APP 6	4,8	3,2	< 0,1	1,4	6,3	0,5	0,6	1,5	6,0
promedio	5,4	3,1	0,0	1,4	6,0	0,5	0,6	1,6	5,9

Tabla 6.12. Resultados medidas pasivas COVs

	benzene	toluene	styrene	tetrachloroethylene	Trichloroethylene	mp-xylene	o-xylene	1,4-dichlorobenzene	alpha-pinene	ethylbenzene
Lím. s/ guías	<1,7	<250	<30	<250	<20	<500	<500	<150	<200	<850
APP 1	1,40	5,30	1,20	0,28	< 0,044	2,60	1,10	< 0,055	1,50	0,94
APP 3	1,30	6,60	1,50	0,28	< 0,045	2,60	1,00	< 0,055	2,60	0,89
APP 6	1,50	6,40	0,71	0,24	< 0,045	2,10	0,79	< 0,055	2,10	0,75
promedio	1,40	6,10	1,14	0,27	0,045	2,43	0,96	0,06	2,07	0,86

En las Figs.6.25 a 6.28 se representan los resultados de las medidas tomadas en el aula por los sensores Sewi y registrados por el Knx durante la muestra central de la Etapa 2 (11-14). En la gráfica recogida en la Fig.6.25 se representan todas las medidas de las aulas ensayadas para CO<sub>2</sub>, temperatura interior y humedad relativa.

#### ETAPA 2 (diciembre 2018). Aulas primaria (APP1-APP6)

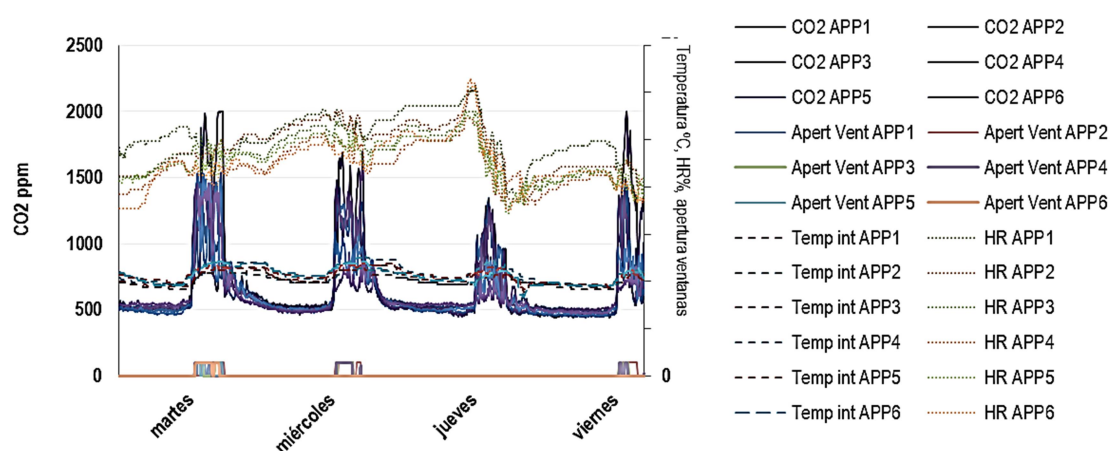


Fig.6.25. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX de una semana de diciembre de 2018 en 6 aulas de educación primaria. (fuente: propia)

En la gráfica de la Fig.6.25 se representan en el eje “x” los días de la semana de los que se analizan las medidas. En el eje “y” izquierda se identifica el nivel de CO<sub>2</sub> (en ppm) y en el eje “y” a la derecha la temperatura interior (°C), la humedad relativa (%) y las aperturas de las ventanas automáticas. Los valores interiores de temperatura (°C), HR (%) y concentración de CO<sub>2</sub> (ppm) obtenidos por el sensor Sewi de cada aula (APP1-APP2 con ventilación libre; APP3-APP4 con SVNI y APP5-APP6 con SVM) se representan en las Figs.6.26 a 6.28.

#### APP1-APP2 (LIBRE) diciembre 2018

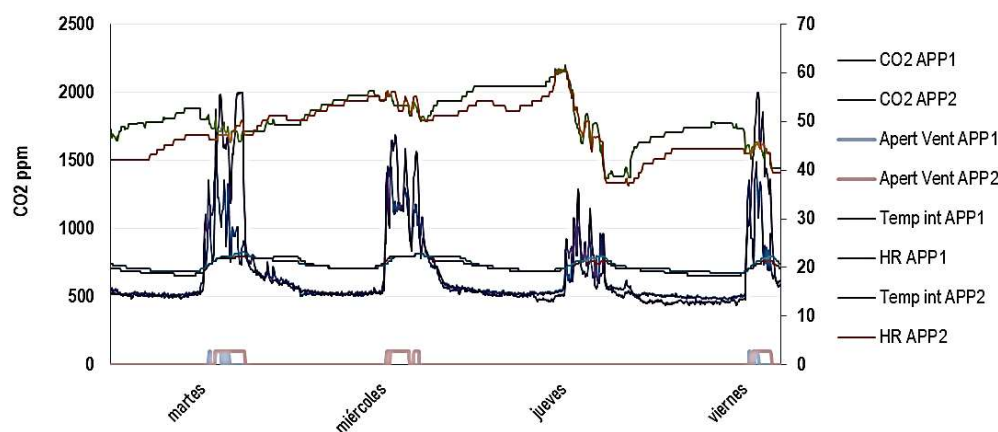
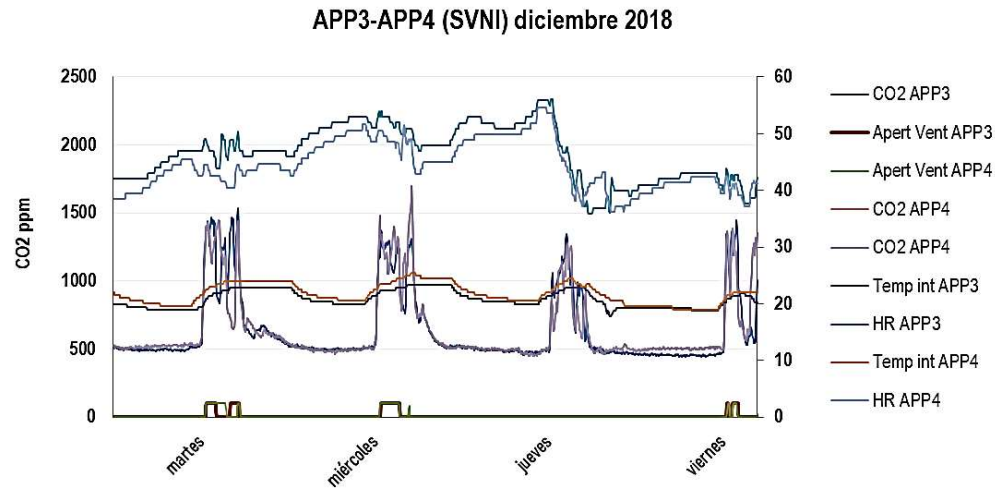
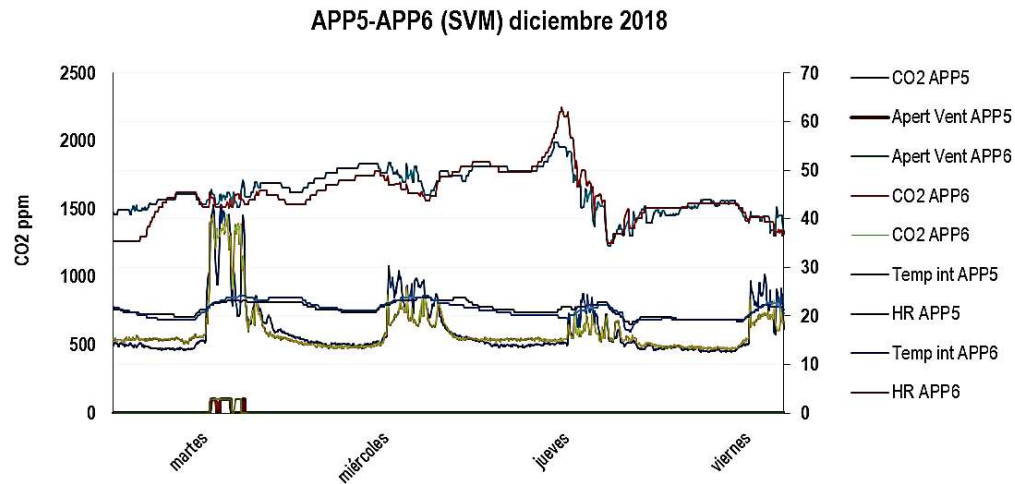


Fig.6.26. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX de una semana de diciembre de 2018 en las aulas de educación APP1 Y APP2 (con ventilación libre. (fuente: propia)

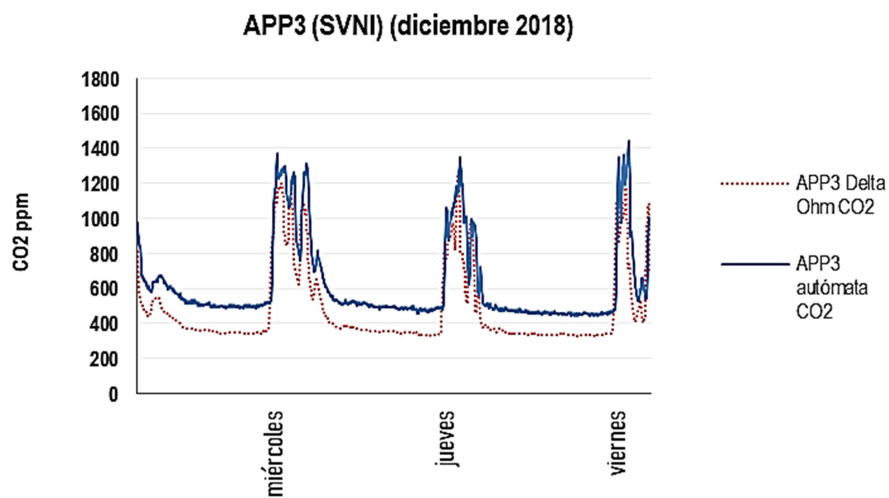


**Fig.6.27.** Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX de una semana de diciembre de 2018 en las aulas de educación primaria APP3 y APP4 (con SVNI). (fuente: propia)



**Fig.6.28.** Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX de una semana de diciembre de 2018 en las aulas de educación primaria APP5 y APP6 (con SVM). (fuente: propia)

Por último, en la gráfica de la Fig.6.29, se representan los resultados de calibración de los sensores con los equipos portátiles.



**Fig.6.29.** Calibración de las sondas fijas del edificio (sensor Sewi-Knx con los equipos portátiles Delta Ohm). En el aula APP3 (fuente: propia)

**ETAPA 3. Medidas de validación.** Se realizan pruebas con medidas en continuo tomándose los datos registrados por el autómata, apoyados por los resultados de los equipos portátiles, para validar las medidas en época intermedia (medidas de abril de 2019 con apertura controlada de puertas y ventanas).

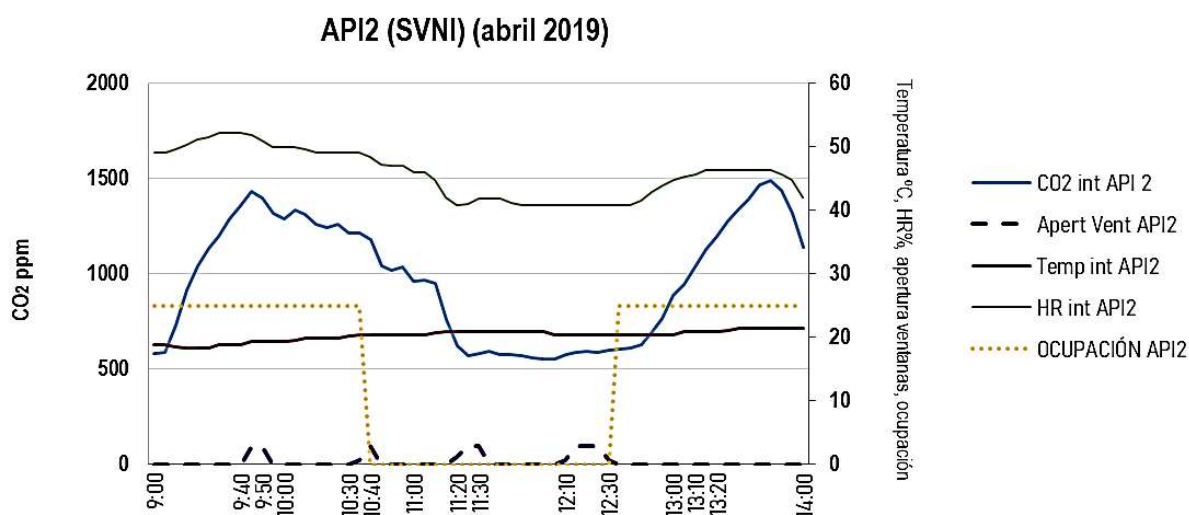
En este caso se programó la apertura y cierre de las ventanas del SVNI para coordinarlo con el descanso e intermedio de las lecciones, dando respuesta a la solicitud del usuario y siguiendo las recomendaciones de la OMS de establecer pautas de ventilación vinculadas con la ocupación y la actividad escolar. De este modo, se establece un procedimiento preconfigurado en el que se activa la apertura de las ventanas 5 minutos antes de la finalización de cada lección y se activa el cierre 5 minutos después del inicio de la siguiente. Así mismo, se opera la apertura de las ventanas durante el tiempo de duración del recreo de media mañana.

En las siguientes tablas y figuras se representan las acciones llevadas a cabo y las medias obtenidas en cada caso. (Tabla 6.13 y Fig.6.30 API2; Tabla 6.14 y Fig.6.31 API3; Tabla 6.15 y Fig.6.32 API4; Tabla 6.16 y Fig.6.33 APP1; Tabla 6.16 y Fig.6.34 APP3 y Tabla 6.18 y Fig. 6.35 APP5)

**Tabla 6.13.** Registro de actividad aula de infantil API2

API2 Hora	Actividad	Ventanas SVNI	Ventanas manuales	Lamas	Nº alumnos	Observaciones
9:00 – 9:45	CLASE 1	Cerradas	Cerradas	Abiertas	25	Puertas abiertas
9:40 – 9:50	Entreclase	Abiertas	Cerradas	Abiertas	25	
9:45 – 10:30	CLASE 2	Cerradas	Cerradas	Abiertas	25	
10:30 – 10:40	DESCANSO 1 (En clase)	Abiertas	Cerradas	Abiertas	25	
10:40 – 11:25	CLASE 3	Cerradas	Cerradas	Abiertas	0	Aula vacía
11:20 – 11:30	Entreclase	Abiertas	Cerradas	Abiertas	0	Aula vacía
11:25 – 12:10	CLASE 4	Cerradas	Cerradas	Abiertas	0	Aula vacía
12:10 – 12:30	DESCANSO 2 (Recreo)	Abiertas	Cerradas	Abiertas	0	
12:30 – 13:15	CLASE 5	Cerradas	Cerradas	Abiertas	25	
13:10 – 13:20	Entreclase	Abiertas	Cerradas	Abiertas	25	
13:15 – 14:00	CLASE 6	Cerradas	Cerradas	Abiertas	25	

En la Tabla 6.13 se recogen las acciones llevadas a cabo en el aula durante la jornada de ensayo, identificándose la hora, la clase, la situación de las ventanas manuales y el número de alumnos. Se reflejan también las acciones de apertura que se programan con las ventanas automáticas.



**Fig.6.30.** Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX y registro de actividad aula API2

En la gráfica de la Fig. 6.30 se representan los valores interiores medidos a lo largo de la jornada por el sensor Sewi del aula y registrado por el Knx. En el eje "x" se representan las horas de la jornada lectiva más significativas. En el eje "y" a la izquierda se representa el nivel de CO<sub>2</sub> medido en ppm y a la derecha los niveles de temperatura (°C) y HR (%). Así mismo, se incluyen los niveles de ocupación (nº de alumnos) (eje "y" derecha) y la apertura de ventanas automáticas (valor absoluto si/no).



Tabla 6.14. Registro de actividad aula de infantil API3

API3 Hora	Actividad	Ventanas SVNI	Ventanas manuales	Lamas	Nº alumnos	Observaciones
9:00 – 9:45	CLASE 1	Cerradas	Cerradas	Abiertas	21	Puertas abiertas
9:40 – 9:50	Entreclase	Abiertas	Cerradas	Abiertas	21	
9:45 – 10:30	CLASE 2	Cerradas	Cerradas	Abiertas	21	
10:30 – 10:40	DESCANSO 1 (En clase)	Abiertas	Cerradas	Abiertas	21	
10:40 – 11:25	CLASE 3	Cerradas	Cerradas	Abiertas	21	
11:20 – 11:30	Entreclase	Abiertas	Cerradas	Abiertas	21	
11:25 – 12:10	CLASE 4	Cerradas	Cerradas	Abiertas	21	
12:10 – 12:30	DESCANSO 2 (Recreo)	Abiertas	Cerradas	Abiertas	0	
12:30 – 13:15	CLASE 5	Cerradas	Cerradas	Abiertas	21	
13:10 – 13:20	Entreclase	Abiertas	Cerradas	Abiertas	21	
13:15 – 14:00	CLASE 6	Cerradas	Cerradas	Abiertas	21	

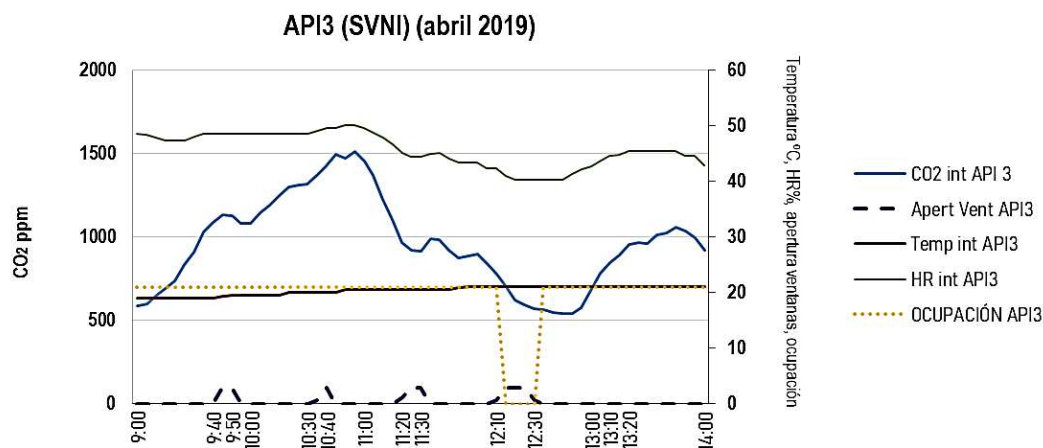


Fig.6.31. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX y registro de actividad aula API3. (fuente: propia)

Tabla 6.15. Registro de actividad aula de infantil API4

API 4 Hora	Actividad	Ventanas SVNI	Ventanas manuales	Lamas	Nº alumnos	Observaciones
9:00 – 9:45	CLASE 1	Cerradas	Cerradas	Abiertas	23	Puertas abiertas
9:40 – 9:50	Entreclase	Abiertas	Cerradas	Abiertas	23	
9:45 – 10:30	CLASE 2	Cerradas	Cerradas	Abiertas	23	
10:30 – 10:40	DESCANSO 1 (En clase)	Abiertas	Cerradas	Abiertas	23	
10:40 – 11:25	CLASE 3	Cerradas	Cerradas	Abiertas	23	
11:20 – 11:30	Entreclase	Abiertas	Cerradas	Abiertas	23	
11:25 – 12:10	CLASE 4	Cerradas	Cerradas	Abiertas	23	
12:10 – 12:30	DESCANSO 2 (Recreo)	Abiertas	Cerradas	Abiertas	0	
12:30 – 13:15	CLASE 5	Cerradas	Cerradas	Abiertas	23	
13:10 – 13:20	Entreclase	Abiertas	Cerradas	Abiertas	23	
13:15 – 14:00	CLASE 6	Cerradas	Cerradas	Abiertas	23	

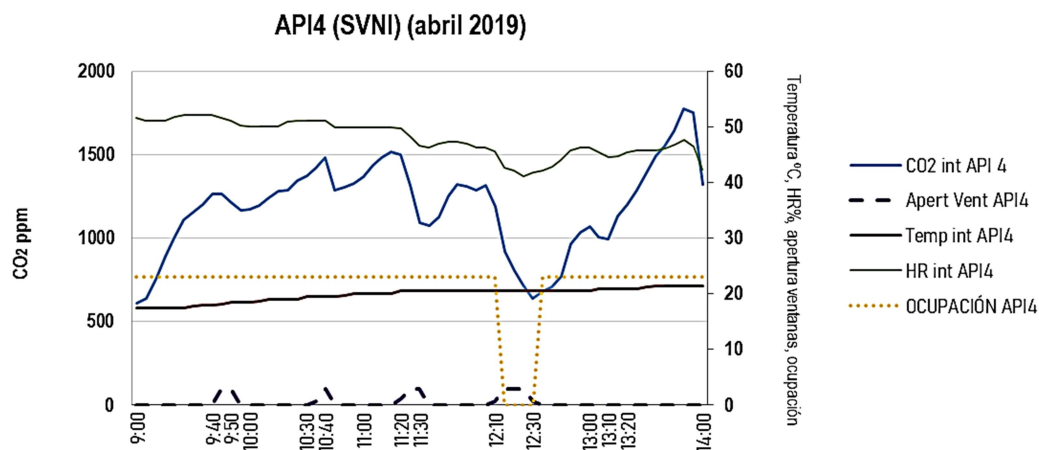


Fig.6.32. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX y registro de actividad aula API4. (fuente: propia)



Tabla 6.16. Registro de actividad aula de primaria APP1

APCP1 Hora	Actividad	Ventanas SVNI	Ventanas manuales	Lamas	Nº alumnos	Observaciones
9:00 – 9:45	CLASE 1	Cerradas	Cerradas	Abiertas	21	
9:40 – 9:50	Entreclase	Abiertas	Cerradas	Abiertas	21	
9:45 – 10:30	CLASE 2	Cerradas	Cerradas	Abiertas	21	
10:30 – 10:40	DESCANSO 1 (En clase)	Abiertas	Cerradas	Abiertas	21	
10:40 – 11:25	CLASE 3	Cerradas	Cerradas	Abiertas	21	
11:20 – 11:30	Entreclase	Abiertas	Cerradas	Abiertas	21	
11:25 – 12:10	CLASE 4	Cerradas	Cerradas	Abiertas	21	
12:10 – 12:30	DESCANSO 2 (Recreo)	Abiertas	Cerradas	Abiertas	0	
12:30 – 13:15	CLASE 5	Cerradas	Cerradas	Abiertas	21	
13:10 – 13:20	Entreclase	Abiertas	Cerradas	Abiertas	21	
13:15 – 14:00	CLASE 6	Cerradas	Cerradas	Abiertas	21	

APP1 (SVNI) (abril 2019)

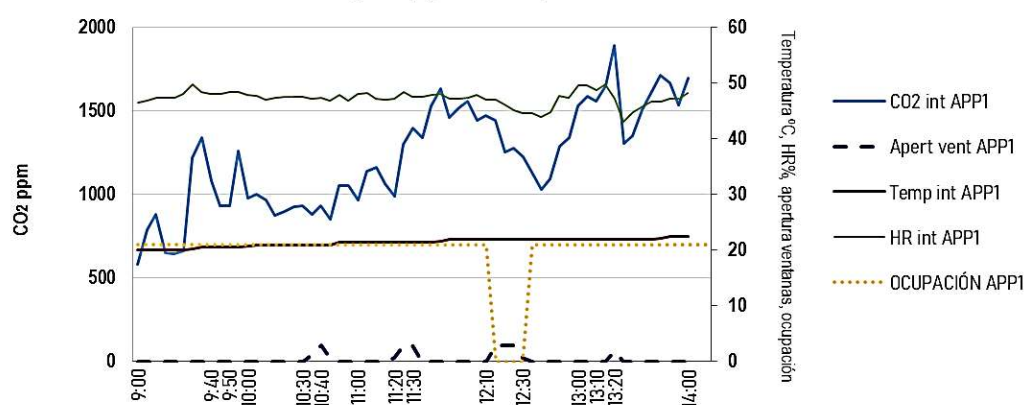


Fig.6.33. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX y registro de actividad aula APP1. (fuente: propia)

Tabla 6.17. Registro de actividad aula de primaria APP3

APCP 3 Hora	Actividad	Ventanas SVNI	Ventanas manuales	Lamas	Nº alumnos	Observaciones
9:00 – 9:45	CLASE 1	Cerradas	Cerradas	Abiertas	22	
9:40 – 9:50	Entreclase	Abiertas	Cerradas	Abiertas	22	
9:45 – 10:30	CLASE 2	Cerradas	Cerradas	Abiertas	22	
10:30 – 10:40	DESCANSO 1 (En clase)	Abiertas	Cerradas	Abiertas	0	Aula vacía/Puertas abiertas
10:40 – 11:25	CLASE 3	Cerradas	Cerradas	Abiertas	0	Aula vacía/Puertas abiertas
11:20 – 11:30	Entreclase	Abiertas	Cerradas	Abiertas	0	Aula vacía/Puertas abiertas
11:25 – 12:10	CLASE 4	Cerradas	Cerradas	Abiertas	0	Aula vacía/Puertas abiertas
12:10 – 12:30	DESCANSO 2 (Recreo)	Abiertas	Cerradas	Abiertas	0	
12:30 – 13:15	CLASE 5	Cerradas	Cerradas	Abiertas	22	
13:10 – 13:20	Entreclase	Abiertas	Cerradas	Abiertas	22	
13:15 – 14:00	CLASE 6	Cerradas	Cerradas	Abiertas	22	

APP3 (SVNI) (abril 2019)

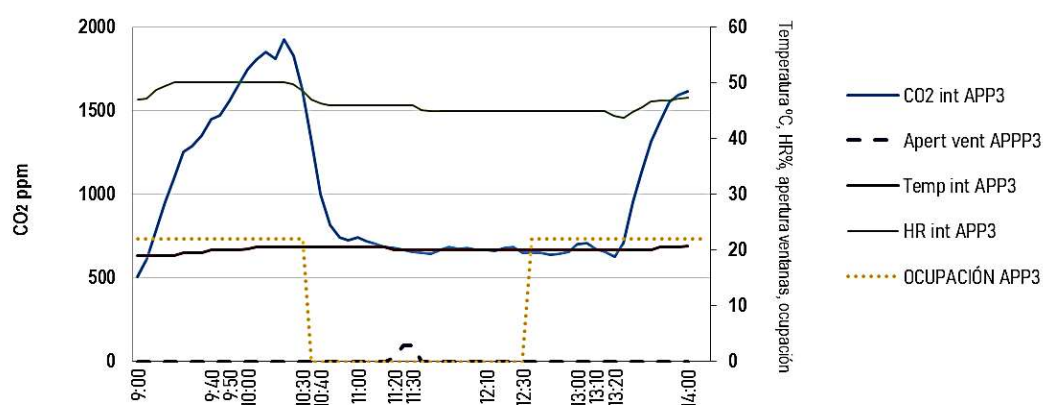


Fig.6.34. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX y registro de actividad aula APP3

Tabla 6.18. Registro de actividad aula de primaria APP5

APCP5 Hora	Actividad	Ventanas SVNI	Venatanas manuales	Lamas	Nº alumnos	Observaciones
9:00 – 9:45	CLASE 1	Cerradas	Cerradas	Abiertas	24	
9:40 – 9:50	Entreclase	Abiertas	Cerradas	Abiertas	24	
9:45 – 10:30	CLASE 2	Cerradas	Cerradas	Abiertas	24	
10:30 – 10:40	DESCANSO 1 (En clase)	Abiertas	Cerradas	Abiertas	24	
10:40 – 11:25	CLASE 3	Cerradas	Cerradas	Abiertas	24	
11:20 – 11:30	Entreclase	Abiertas	Cerradas	Abiertas	24	
11:25 – 12:10	CLASE 4	Cerradas	Cerradas	Abiertas	24	Puertas abiertas
12:10 – 12:30	DESCANSO 2 (Recreo)	Abiertas	Cerradas	Abiertas	0	
12:30 – 13:15	CLASE 5	Cerradas	Cerradas	Abiertas	24	
13:10 – 13:20	Entreclase	Abiertas	Cerradas	Abiertas	24	
13:15 – 14:00	CLASE 6	Cerradas	Cerradas	Abiertas	24	

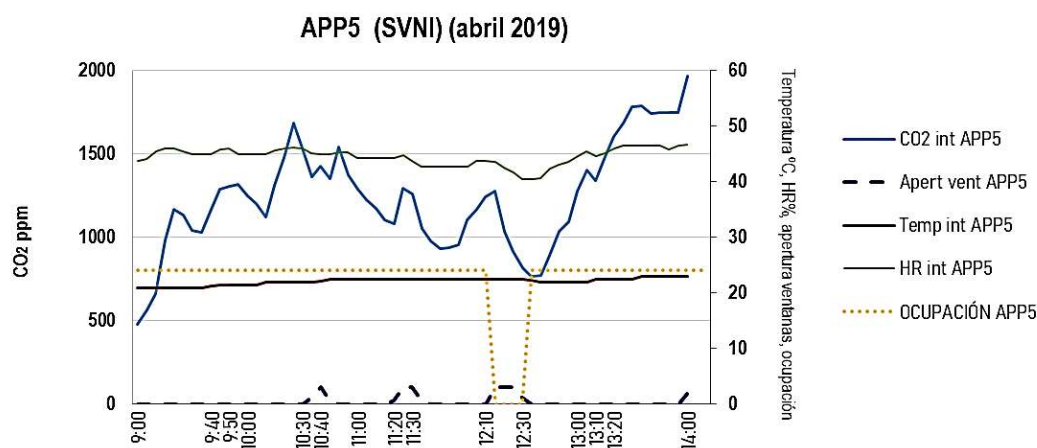
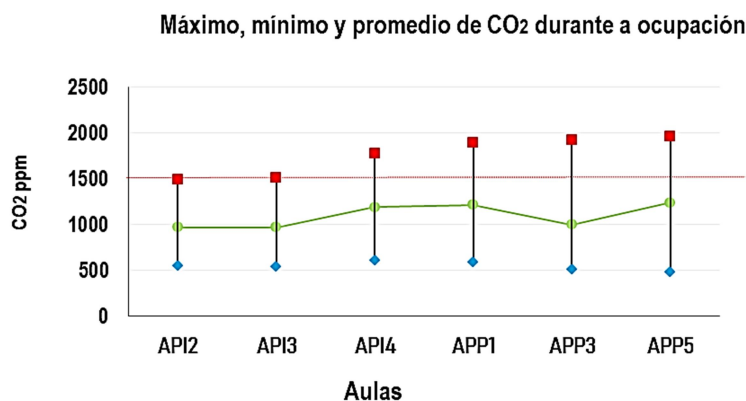


Fig.6.35. Valores medidos por las sondas y grabados por el KNX y registro de actividad aula APP5



**Fig.6.36.** Valores máximos, mínimos y promedios el día del ensayo, en base a los resultados medidos por las sondas y grabados por el KNX en abril de 2019 en 3 aulas de educación infantil (API2, API3 y API4) y 3 aulas de educación primaria (APP1, APP 3 y APP5). (fuente: propia)

En la Fig.6.36 se representan los valores máximos, mínimos y los promedios calculados durante el periodo ocupado en cada aula ensayada, para poder comparar con el límite de referencia definido en la Tabla 6.6.B. En el eje “x” se identifican los días de la semana y el aula de ensayo. En el eje “y” se indican los niveles interiores de CO<sub>2</sub> en ppm (valor máximo, mínimo y promedio calculado), durante el periodo de ocupación del aula (de 9:00 a 14:00 horas), que corresponde con la jornada lectiva del centro.

## 2.3 Análisis y discusión

### Etapa 1. Calibración

**CO<sub>2</sub>.** En la Fig.6.20 Se observa la evolución esperable de CO<sub>2</sub>. La pauta seguida por las gráficas es bastante similar en las 3 aulas, siguiendo además un patrón razonable en cuanto ocupación-no ocupación, por lo que puede decirse que el autómata mide bien y las sondas registran correctamente. Los valores obtenidos se encuentran entre las 500 ppm y las 1800 ppm. La pauta que siguen las aulas es similar en todas ellas. La apertura de las ventanas automáticas se aprecia en los picos más altos de CO<sub>2</sub>. Puede observarse cómo se refleja la desocupación del fin de semana y el patrón mañana-tarde. No se alcanzan en ningún momento concentraciones de 2000 ppm. El fin de semana (viernes tarde, sábado y domingo) los niveles de CO<sub>2</sub> descienden hasta el valor mínimo. Este debería ser el exterior, aunque se aprecia que es ligeramente superior a las 400 ppm que se espera en exteriores, especialmente en esta zona del área metropolitana de Sevilla, apenas sin tráfico y en ámbito casi rural. Para confirmar este punto, se calibra el funcionamiento de las sondas fijas del edificio con equipos portátiles (Figs.6.18 y 6.19) en la que se observan valores de medida de las sondas fijas del entorno de las 100 ppm por encima de los equipos portátiles. Esto puede ser debido al propio proceso de autocalibración del sistema. En cualquier caso, para el análisis de los resultados este factor hace que los que se obtienen de los equipos fijos sean superiores y por tanto se puedan considerar del lado de la seguridad.

La comparación de los 3 sistemas de ventilación se realiza en las Figs.6.21, 6.22 y 6.23. En éstas se representan los niveles de CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad relativa interiores medidas por el autómata KNX a lo largo de una semana. Se observa cómo los días centrales, de medidas controladas (viernes a martes), en el aula 2 con VM (Fig.6.21), los niveles de CO<sub>2</sub> estuvieron por debajo de las 1000 ppm, tal como está proyectada la instalación para responder a un IDA 2, según los parámetros del RITE, utilizando la parte superior del rango 600 ppm (esto es 400 exteriores + 600 ppm), observándose las fluctuaciones de concentración típicas debidas a la ocupación. En la Fig.6.22 (con SVNI), se identifican valores de CO<sub>2</sub> fluctuantes en función de la ocupación, y en este caso, siempre por debajo de las 1500 ppm. Por último, en la Fig.6.23 (aula con ventilación “libre” según criterio del ocupante), se observan registros de apertura del SVNI, debido a la desconfiguración del bloqueo de las ventanas automáticas, por los que, como puede observarse, los resultados obtenidos son muy similares a los de la gráfica anterior.

En la Fig.6.24 se analizan los valores de CO<sub>2</sub> máximo mínimo y promedio. En esta figura no se tienen en cuenta los distintos tipos de ventilación, ya que se activaron sólo los días intermedios de la semana. Todos los valores promedio del periodo de ocupación, independientemente del tipo de ventilación del aula (viernes-lunes) se encuentran por debajo de las 1500 ppm y cercanos a las 1000 ppm. El valor más alto medido se encuentra en el API2, no llegando a las 2000 ppm. Debe tenerse en cuenta que el día de esta medida, el sistema de ventilación estaba desactivado, por lo que el funcionamiento se realizaba según el libre criterio del usuario. En base a estos resultados, puede decirse que se estaría cumpliendo en todos los casos con los valores establecidos por las normas. Así mismo, se observa que el usuario, cuando funciona de manera libre, mantiene pautas adecuadas de aireación del espacio.

**Temperatura y humedad.** La temperatura y la humedad de encuentran en valores muy similares al caso anterior (según se observaba también en la Fig.6.20) Las temperaturas están en el entorno de los 24°C, siendo superior en las horas centrales del día y la humedad oscila a lo largo del día y de la semana con valores entre el 30% y el 65%. En cuanto a los valores de temperatura, se aprecian incrementos asociados a la ocupación del entorno de los 3°C máximo, encontrándose el espacio interior dentro de los parámetros de confort. En estos días, la temperatura se mantuvo en el entorno de los 25°C.

### Etapa 2. Evaluación de la CAI (medida de contaminantes)

**CVOs y aldehídos.** Los niveles de todos los contaminantes analizados se encuentran muy por debajo de los límites (Tablas 6.11 y 6.12). A modo de ejemplo podemos señalar cómo el nivel de formaldehído es 10 veces menor que el límite de referencia y el de butanal 100 veces menor. Sólo se encuentra el nivel de benceno cercano al límite recomendado 1,4 frente a 1,7. Estas emisiones pueden asociarse a la nueva construcción. Aun así, los niveles medidos se encuentran del entorno del 21% por debajo del límite máximo recomendado.

**CO<sub>2</sub>.** Los niveles de CO<sub>2</sub> medidos esa semana (diciembre) por las sondas fijas se representan en las Figs.6.25 a 6.28. Al igual que en la Fig.6.20, los resultados obtenidos para los 3 pares de aulas presentan evoluciones similares. En las aulas APP5 y APP6 con VM activada los días señalados (miércoles y jueves) los niveles no superaron las 1000 ppm. En las aulas APP1 a APP4, el día jueves también hay registros bajos, lo que puede relacionarse con un bajo nivel de ocupación.

**Temperatura y humedad.** Los valores de temperatura se encuentran en el entorno de los 20°C y la humedad oscila entre el 40% y el 60%. En este caso, se presenta una menor coincidencia en los valores de humedad relativa entre las distintas aulas de hasta un 10%. La temperatura presenta mayores valores en los momentos centrales del día, así como una mayor fluctuación diaria, debido a la oscilación de la temperatura exterior típica de la época (diciembre). En cualquier caso, no se observan valores por debajo de los 19°C. Así mismo, no se observa relación entre la temperatura medida en el interior y la apertura de las ventanas automáticas, lo cual sugiere que el tiempo de apertura no es suficiente para afectar en este sentido, tal como se mencionaba en la literatura consultada y se había observado en otros ensayos preliminares.

### **Etapas 3. Medidas de validación**

**CO<sub>2</sub>.** Los valores de la Fig.6.36 representan el máximo medido, el mínimo medido y el promedio de concentración obtenido durante el periodo de ocupación (de 9:00 a 14:00 horas según el horario lectivo). En ningún caso se supera el valor promedio de 1500 ppm, encontrándose el 50% de las aulas ensayadas en el entorno de las 1000 ppm. Tampoco se superan las máximas de 2000 ppm, alcanzándose valores cercanos en los casos en que no se operan las ventanas (Fig.6.3 a 6.35) y existe ocupación del aula. Los valores mínimos registrados están del entorno de las 500 ppm, 100 ppm por encima de lo esperado y lo medido por las sondas portátiles.

En general se observa que actuar las ventanas de manera pautada a lo largo de la jornada colabora en el mantenimiento de los niveles de CO<sub>2</sub> dentro de los límites previstos. En el fondo, esto es lo que viene a conseguir el SVM, con programación horaria, ya que insufla aire de una manera constante a lo largo del periodo de la ocupación, obteniendo niveles en el límite preconfigurado y por encima del mínimo posible, que no es más que el nivel existente en el exterior (Figs.6.30 a 6.35), presentando la solución del SVNI la ventaja de no consumir electricidad ni ser una potencial fuente de contaminantes.

**Temperatura y humedad.** La temperatura registrada está en el entorno de los 20°C en todas las aulas, con un valor ligeramente inferior al inicio de la jornada y creciente a lo largo del día. En cuanto a la humedad interior se encuentra en valores entre el 40 y el 50% a lo largo de día, siendo ligeramente superior a primera hora. Tal como se ha observado en el resto de gráficas analizadas, la temperatura interior medida no se ve afectada por la operación de las ventanas ni por la entrada del aire del exterior.

## **CAPÍTULO 7\_RESULTADOS**

**MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS EDIFICIOS DE USO EDUCATIVO EN CLIMA MEDITERRÁNEO:  
Aplicación práctica de diseño y cálculo de Sistemas de Ventilación Natural**





## **CAPÍTULO 7.-RESULTADOS**

En este Capítulo se resumen el análisis y discusión de los resultados obtenidos. Se muestran los principales resultados y se realiza un resumen capítulo a capítulo de las principales aportaciones y conclusiones preliminares, que se detallarán en el siguiente Capítulo 8.



Los principales resultados obtenidos en cada capítulo se relacionan a continuación:

## CAPÍTULO 1.-ESTADO DEL ARTE

**La sostenibilidad y el desarrollo sostenible.-** En este apartado se han tratado las cuestiones relacionadas con la sostenibilidad y la eficiencia energética. Enfocado en los edificios, puede decirse que el edificio más sostenible es el que menos consume, no porque sus sistemas sean muy eficientes, sino porque no los necesite. Los sistemas que más energía consumen en los edificios en la zona mediterránea son los relacionados con la refrigeración, siendo las soluciones arquitectónicas bioclimáticas, y en algunos casos aquéllas que se pueden recuperar de la arquitectura vernácula, prometedoras en cuanto a su eficaz desempeño para obtener edificios de bajo perfil de consumo energético.

Entre las distintas soluciones bioclimáticas que pueden colaborar en la reducción de la demanda de refrigeración, la ventilación natural destaca como una de las más interesantes, conocida como “ventilative cooling” o refrigeración pasiva. La refrigeración pasiva se encuentra íntimamente ligada a la definición del concepto de confort adaptativo para definir el confort térmico de las personas en los espacios interiores.

Por otro lado, el confort adaptativo no es de aplicación exclusiva a los sistemas pasivos de refrigeración, ya que es un concepto que bien empleado para el diseño de sistemas activos de acondicionamiento térmico puede proporcionar una reducción en la demanda de calefacción y refrigeración en los edificios. Así mismo, las soluciones basadas en la utilización del aire exterior, colaboran también en la mejora de la calidad del aire interior, tal como se desarrolla en el siguiente capítulo.

**La Calidad del Ambiente Interior.-** En este capítulo se ha analizado la cuestión de la Calidad del Ambiente Interior, de entre cuyos factores destaca la CAI, necesaria para una adecuada salubridad de los espacios. Aunque habitualmente la CAI se controla con la ventilación, ciertas recomendaciones (OMS) sugieren que previamente se eliminen o reduzcan los contaminantes que puedan producirse en su origen, para a continuación, proceder a ventilar el ambiente, sustituyendo el aire interior por aire exterior para eliminar o diluir los contaminantes. A continuación se identifica la vinculación que existe entre la ventilación y el ahorro de energía, para lo que la normativa se ha centrado en reducir las infiltraciones en los edificios y en incrementar el aislamiento de las envolventes. Ambos factores en ocasiones han contribuido negativamente, empeorando la CAI e incrementando el sobrecalentamiento en los espacios interiores. En estas circunstancias, el diseño y cálculo de los sistemas de ventilación ha cobrado mayor importancia, siendo necesaria la optimización entre el volumen de renovaciones, la concentración de contaminantes y el consumo de energía. En cuanto a los sistemas de ventilación más habituales, se ha subrayado la problemática que relaciona los SVM con un mayor nivel de contaminantes y el SBS. También se ha identificado el CO<sub>2</sub> como el gas trazador que suele emplearse para evaluar la calidad del aire en interiores, indicándose también que no es un contaminante en sí mismo, no siendo nocivo en los niveles que habitualmente se dan en edificación. Por último se ha incorporado una relación de los principales grupos de investigación internacionales y proyectos específicamente centrados en la ventilación desde el punto de vista del diseño urbano y de los edificios.

**Los Sistemas de Ventilación Natural.-** En este capítulo se ha tratado ampliamente y de manera específica el tema de la VN, analizando sus fundamentos de funcionamiento, su relación con el clima y la viabilidad de su utilización para el ahorro de energía en los edificios. Se han descrito las diferentes estrategias de diseño, que ayudan en la clasificación del tipo de sistemas, así como su diferente nivel de eficacia. También se ha visto cómo la VN no es un concepto que pueda incorporarse al proyecto con posterioridad a la formalización del diseño, sino que debe estar presente desde las primeras reflexiones, dado que estos sistemas y su desempeño están íntimamente ligados al clima, a la localización geográfica del edificio, su posición relativa en la zona urbana, etc... Así mismo, el uso del edificio, que condicionará la organización de los espacios, también es un factor a tener en cuenta a la hora de su diseño.

En cuanto a las estrategias de VN que se pueden emplear, se observa cómo la ventilación cruzada presenta mejor rendimiento que la desarrollada a una cara, y su efectividad se mejora si se combina con el efecto chimenea ("stack"). Aunque el empuje del aire por efecto chimenea es menor que el del viento, su capacidad de autoajuste es más fiable, por lo que hay autores que recomiendan que los sistemas de VN se diseñen para el "peor caso" de operación solo con efecto chimenea, ya que el viento sufre fluctuaciones en la intensidad. A su vez, la ubicación de la ventana es determinante para la tasa de ventilación y la temperatura alcanzada dentro del edificio, aun teniendo las mismas superficies de apertura. Junto a esto, con las ventanas altas, ubicadas cerca del techo, el riesgo de corriente de aire es muy pequeño en la zona ocupada.

Otra apreciación importante es el papel de la VN como estrategia para ahorrar energía durante la temporada de transición e invierno en edificios con altas ganancias de calor interno.

En cuanto a la reglamentación técnica, se observa cómo estos sistemas están desarrollados a nivel internacional, pero en España aún no se contemplan en la normativa, a pesar de que cumplen de manera eficaz con los objetivos marcados en las DE en cuanto a la consideración del clima de la zona en las soluciones que se adopten para el acondicionamiento de los edificios y el equilibrio coste-eficacia. Junto a esto, se ha observado el interés creciente en este campo de investigación a través del número de publicaciones identificadas en Scopus.

Por otro lado, aunque las herramientas de certificación actualmente accesibles en España no consideran estos sistemas, existen programas de cálculo y simulación que permiten evaluar su potencial y dimensionarlos, incluyéndolos en el balance termodinámico de los edificios. Se ha mostrado también una relación de las principales empresas que comercializan este tipo de sistemas e instalan sus productos en edificios de diferentes usos y localizaciones.

En resumen, se detecta en España una falta de reglamentación técnica e investigación específica en materia de VN aplicada a edificación, a pesar de las condiciones climáticas favorables existentes. Con la investigación que se desarrolla en esta tesis doctoral se pretende cubrir parte de este conocimiento e iniciar una vía de investigación científica y desarrollo comercial de este tipo de sistemas y dispositivos en nuestro país.

**Los edificios de uso educativo en el marco de la sostenibilidad.-** En este capítulo se analizan los edificios de uso educativo desde el enfoque de la sostenibilidad y sus oportunidades de mejora, dado que los edificios escolares consumen entre el 4% y el 10% de la energía del sector no residencial dependiendo del clima (España frente a Reino Unido), pudiéndose estimar valores muy dispares para por ejemplo la carga de calefacción, entre los 24 kWh/m<sup>2</sup> de escuelas en Roma hasta los 196 kWh/m<sup>2</sup> en Reino Unido.

Se muestra también cómo la OMS sugiere combinar los avances en arquitectura e ingeniería con los enfoques tradicionales del clima y los valores culturales para diseñar edificios escolares sostenibles, dado que, según el informe SINPHONIE, no siempre se integran adecuadamente los modelos arquitectónicos y prácticas importadas de otras regiones con los valores locales. A su vez, las DE estiman que el diseño de los nuevos edificios debe realizarse de acuerdo con el clima local con el objetivo de reducir el impacto del consumo de energía a largo plazo. Por tanto, la aplicación de estándares, reglamentos y soluciones técnicas basadas en experiencias en regiones de clima frío no se deben aplicar literalmente a los diseños de nuevos edificios escolares en áreas del Mediterráneo y la vía para diseñar edificios de baja energía o de energía casi nula debe ser diferente para evitar que se produzca un sobrecalentamiento del espacio interior debido al exceso de hermeticidad de las edificaciones. Otros estudios analizan la mejora de la envolvente en relación a la eficiencia energética, tanto en clima frío como cálido, lo cual, si se estudia desde el análisis del ciclo de vida, debe evaluar su sostenibilidad durante toda la etapa operacional y no puntualmente desde una determinada fase. A su vez, la solución que se plantee, debe analizarse conjuntamente con la CAI y la ventilación, para lograr el equilibrio con el sobre-aislamiento y la hermeticidad. En este sentido, la solución tradicional de cerramientos de fábrica y estructura de hormigón ofrece un buen resultado si se considera el conjunto total de toda la fase de vida útil. La utilización de elementos de sombreado también se puede considerar para la mejora de la envolvente y sus prestaciones en clima cálido.

Se señala el carácter ejemplarizante que subraya la DE que pueden tener las acciones encaminadas a la eficiencia energética en los edificios públicos frente a los promotores privados y el conjunto de la ciudadanía, así como que

actuar en los edificios públicos supone una oportunidad para reducir costes de funcionamiento y, de este modo, aumentar los fondos que puedan ser destinados a otros propósitos, con el consiguiente impacto en la comunidad educativa y en la sociedad.

Se analiza también la cuestión de la calidad del ambiente interior en los espacios de uso educativo, en los cuales la CAI juega un papel fundamental en la enseñanza y el aprendizaje. En este sentido, se han identificado las siguientes características aplicables a edificios escolares: i) el CO<sub>2</sub> suele emplearse como indicador de la CAI, aunque también se recomienda el control de las fuentes de contaminantes; ii) debe tenerse en cuenta el posible sobrecalentamiento del aula cuando se apliquen medidas de conservación de la energía; iii) en aulas es de aplicación el principio de confort adaptativo; iv) deben seguirse las recomendaciones relacionadas con la forma de uso y funcionamiento de los edificios, tales como realizar paradas entre clases en la que se lleve a cabo la aireación del espacio, reducir la ocupación a un máximo de 1 persona cada 2 m<sup>2</sup>, aumentar la tasa de renovación del aire interior con aire exterior y mejorar la limpieza de las instalaciones.

En cuanto a la CAI, esta se vincula a la ventilación que se muestra insuficiente en numerosos estudios y se asocia a diversas molestias y enfermedades. La OMS recomienda, para una buena CAI en los edificios escolares, el control de la fuente de contaminantes como estrategia prioritaria junto con la adecuada selección de la localización del edificio, su diseño y materiales, así como la gestión del uso y el mantenimiento del mismo. Una vez hecho esto, podrá diseñarse el sistema de ventilación más adecuado para cada tipo de edificio.

Frente a los problemas que se documentan en edificios escolares con SVM, la VN se evidencia como una alternativa viable, factible, sostenible y en consonancia tanto con el clima mediterráneo como con las directrices de las directivas europeas en este sentido. Este tipo de edificios presenta además una serie de características específicas (ventanas amplias practicables, ventilación cruzada a pasillos, etc.) que hacen que sea sencillo implementar en su diseño estrategias de VN. En cuanto al diseño de estos sistemas, deben tenerse en cuenta las siguientes recomendaciones:

1. Se recomienda una ventilación mínima de 4 l/s y persona.
2. La OMS identifica como niveles aceptables de concentración de CO<sub>2</sub> si el promedio alcanzado durante el periodo de ocupación del espacio está en el rango entre 1000 a 1500 ppm, cuando todas las fuentes de contaminación se encuentran controladas.
3. Se recomienda que la ventilación se haga coincidir con los intermedios de las lecciones.
4. La ventilación cruzada es más eficaz que a una cara. Esta se mejora con dispositivos de efecto chimenea.
5. Las ventanas automáticas mejoran los resultados de la ventilación, al hacerla independiente del usuario.
6. Las pérdidas del sistema de calefacción por el funcionamiento de la VN, no son más que una carga adicional que hay que tener en cuenta en el cálculo. Además, en la práctica se puede esperar que estas pérdidas se compensen parcialmente con las ganancias debidas al calor metabólico producido por los ocupantes junto con las debidas a la iluminación, los equipos informáticos y otras fuentes.

Por último, se muestra una extensa literatura científica relacionada con la aplicación de soluciones de VN a edificios escolares así como se muestran ejemplos prácticos, normativa específica para el diseño de estos sistemas en edificios educativos, así como ejemplos existentes en la arquitectura tradicional.

## CAPÍTULO 4.-CARACTERIZACIÓN DEL MODELO

**Tipología de edificio demostrador.** - En este capítulo se ha abordado la cuestión de cómo el sector de los edificios escolares es único en el conjunto de la edificación, presentando tipologías específicas e infraestructuras singulares. Se ha profundizado en estas cuestiones desde el enfoque del diseño espacial y dimensional del edificio, el tipo de usuario, el número de ocupantes y el aspecto de la densidad de ocupación, así

como la forma en que se usa el edificio y se utilizan los recursos. Los datos más representativos se resumen a continuación:

- Según la norma sectorial, se recomienda, entre otras cuestiones, que los edificios de uso docente se diseñen teniendo en cuenta el entorno urbano y las condiciones bioclimáticas del lugar. Así mismo, deben promoverse las instalaciones de energías renovables e integrar arquitectura y naturaleza incorporando ajardinamiento de los espacios exteriores.
- Los nuevos centros se ubican en grandes parcelas en la periferia de los núcleos urbanos, en zonas con buena calidad del aire exterior. En ellas la edificación se ubica exenta con buena exposición a los vientos dominantes.
- El tipo de centro más habitual presenta un tamaño medio de 2.500 m<sup>2</sup>, suelen ser edificios de 2 plantas y construirse en parcelas de unos 8.100 m<sup>2</sup>, y puede ser usado por hasta 450 alumnos de entre 3 y 12 años de edad.
- El aula suele caracterizar el modelo de edificio que basan su esquema en una organización y agrupación racional de los espacios. Ésta dispone de ventanas de grandes dimensiones para una adecuada iluminación y ventilación, que suele combinar con ventanas al pasillo en el paramento opuesto para permitir la ventilación cruzada.
- En los espacios de uso docente se pueden aplicar principios de confort adaptativo. A su vez, los parámetros de confort en adultos no son de aplicación directa a los espacios ocupados por niños en las escuelas.
- Los edificios escolares pueden diseñarse en modo mixto, acondicionados en invierno en oscilación libre el resto del curso. En este último caso, se pueden aplicar las condiciones de confort para espacios no acondicionados mecánicamente que marca el Standar 55 de ASHRAE.
- Las condiciones de CAI y los sistemas que la garanticen deben analizarse de manera independiente de los de confort térmico, dado el diferente rango temporal en que son necesarios unos y otros.
- Los espacios de uso docente tienen una utilización discontinua y no permanente, con un grado de utilización anual del 8,12% del tiempo para educación secundaria y del 11,8% para educación infantil y primaria.
- El aula es un espacio de elevada densidad de ocupación (entre 1,66 y 1,92 m<sup>2</sup> por ocupante) en el que el principal usuario es el alumno. La actividad metabólica por la que se genera CO<sub>2</sub>, calor y humedad, es determinante en la caracterización de estos espacios.
- También se ha analizado la cuestión del mantenimiento de la edificación a lo largo de su vida útil como elemento independiente y factor fundamental que debe estar presente en la elección de los materiales, soluciones constructivas e instalaciones, con la finalidad de una mejor utilización de los fondos públicos.

Todas las características mencionadas en este apartado determinan el uso y funcionamiento de los edificios de uso escolar, por lo que deben ser tenidas en consideración como aspectos básicos del diseño de los edificios y sus instalaciones.

**Ámbito geográfico y climático.-** En este apartado se ha tratado el tema del clima en Andalucía, para lo cual se ha realizado una caracterización geográfica y climática en general, seguida de una clasificación de los municipios andaluces, en el marco de lo establecido por el CTE en cuanto a las condiciones climáticas de invierno y de verano. Se ha comprobado que, en contra de los que podría pensarse en una aproximación superficial, el número de municipios con la máxima severidad climática de verano (4) son menos del 50% (SCV4 son el 37%, 285 municipios). Así mismo, 64,54% de los municipios presentan severidades climáticas de invierno C ó D (497).

A continuación se ha realizado un análisis de las temperaturas para cada zona climática, realizando una primera aproximación en términos de temperaturas medias anuales, para a continuación realizar un análisis más específico centrado exclusivamente en el periodo y horario lectivos. Para esto se han utilizado 3 bases de datos de



temperaturas, con la finalidad de validar suficientemente los resultados. Como resultado principal de este análisis se obtiene que los meses con las temperaturas más elevadas en el marco analizado, son junio y septiembre. En éstos, además, el porcentaje de horas lectivas anuales con temperaturas superiores a 27°C es del 3,38% para la zona climática C4, y sólo del 1,01% para temperaturas superiores a 30°C, lo cual se concentra en 7,67 días lectivos en el curso escolar. Se ha observado además que la hora punta de temperatura en el día más caluroso se alcanza siempre por la tarde tras la finalización de la jornada escolar. Este dato debería ser un punto de partida para reflexionar sobre si la utilización de sistemas de aire acondicionado en las aulas y espacios docentes es la opción más adecuada y sostenible para garantizar el confort térmico en época de verano. En cuanto a las condiciones de invierno, prácticamente en todas las ZC es recomendable la utilización de sistemas de calefacción para garantizar el confort, por estar todos los valores medios de temperaturas analizados a primera hora de la jornada, para las zonas climáticas con mayor número de municipios, siempre por debajo de los 10°C y en el entorno de los 5°C en los meses centrales del curso (noviembre a abril).

Finalmente, se muestra cómo utilizando herramientas como las cartas bioclimáticas de Givoni y Olygay se pueden diseñar estrategias bioclimáticas en todas las zonas de Andalucía para el diseño de edificios más sostenibles y menos dependientes de los sistemas mecánicos de acondicionamiento. Como estrategia bioclimática se evalúa la ventilación en todos los casos.

El BB101 de 2006 [1] establece una serie de factores a tener en cuenta para evaluar el sobrecalentamiento en el interior de las aulas. La versión de 2016 [2], aplica nuevos criterios basándose en el principio de confort adaptativo, según se contempla en la UNE EN 15251 y en la publicación de CIBSE TM52 [3], en lugar de un factor fijo de 28°C, utilizado en la del 2006. Su finalidad es la de prever los futuros efectos del cambio climático en el diseño de los edificios y su uso. Así mismo, prescribe la utilización de zonas de sombras y porches, así como indica que se tengan en consideración posibles efectos de sobrecalentamiento que pueden ir asociados a la incorporación en los edificios de atrios acristalados, así como el efecto “isla de calor”.

Con un enfoque similar al anterior, se plantea una metodología de estudio para evaluar el potencial sobrecalentamiento que se puede producir en el aula, en este caso en función de las temperaturas exteriores. Para ello se plantea la siguiente hipótesis: Si las temperaturas exteriores son inferiores a 27°C en la jornada lectiva, en un edificio bien diseñado, renovando el aire interior puede alcanzarse la condición de confort, al sustituir el aire interior a mayor temperatura por el exterior que como máximo estará a 27°C. Para la evaluación de la aplicación de la hipótesis en la zona climática que se estudie, se considera que puede ser admisible que esta temperatura de 27°C pueda sobrepasarse un 10% del total de horas lectivas anuales. Se tienen además en cuenta las siguientes consideraciones: i) Las aulas deben tener una adecuada y suficiente ventilación cruzada; ii) El diseño de los edificios deber tener en cuenta unas condiciones adecuadas de inercia térmica de los cerramientos y suficientes y adecuados elementos de sombra en los exteriores, especialmente en las fachadas orientadas a sur. Aplicando este criterio, y para contrastar la estimación previa realizada en el apartado anterior, se analizan 3 bases de datos de temperaturas diferentes, con la finalidad de conocer el número de horas del horario escolar en que las temperaturas exteriores están por debajo de un cierto umbral y por tanto, es posible utilizar este tipo de estrategia.

Si se considera en la hipótesis que cuando el aire exterior permanece por debajo de una cierta temperatura (27°C), es posible renovar el aire interior con técnicas de VN, utilizando acciones de refrigeración pasiva. Las temperaturas máximas en el exterior la mayoría de los días de mayo son inferiores a 27°C, mientras que en junio y septiembre permanecen entre 27°C y 30°C, con varios días por encima de 30°C pero por debajo de 35°C, como se muestra en la Fig.4.22. Además, como la temperatura exterior permanece por debajo de cierto nivel durante la noche y se muestra que existe una diferencia entre las temperaturas diurnas y nocturnas entre los 15°C y los 20°C, se pueden utilizar para conseguir el refrescamiento de la estructura y de la envolvente técnicas de enfriamiento nocturno para mejorar el efecto de la ventilación en el sobrecalentamiento interior. Analizando los datos reflejados en los gráficos de la Fig.4.23, se observa cómo la temperatura máxima del día se alcanza en torno a las 17:00 horas y en todos los casos fuera del horario lectivo. Por tanto, en principio y considerando un diseño correcto de los edificios y de los espacios exteriores, con una elección adecuada de materiales y una buena práctica de uso y funcionamiento por parte del usuario, los datos analizados no justifican suficientemente la inclusión generalizada de los sistemas de aire acondicionado mecánicos en los edificios escolares con el calendario escolar actualmente vigente. En este caso se

consideran más adecuadas y sostenibles soluciones bioclimáticas o pasivas y la utilización de principios de confort adaptativo para el acondicionamiento de los edificios escolares en el ámbito geográfico analizado.

**Caracterización de la necesidad.-** En este apartado se detalla la causa que origina la necesidad de esta investigación. Tiene su origen en la normativa relativa a la eficiencia energética de los edificios, que se ha orientado al incremento de la hermeticidad de las construcciones mediante la traslación literal de soluciones típicas de climas fríos, como son las instalaciones de VM con recuperadores de calor, a la normativa española. Esto ha producido un gran impacto en la forma de diseñar, e incluso de utilizar los edificios escolares a nivel nacional. Del análisis que se realiza en este capítulo de las condiciones de diseño de una selección de edificios construidos de este modo, se obtiene que el coste estimado de su ejecución puede llegar a alcanzar el 10% del importe total de la inversión de la infraestructura. Además, el consumo de energía asociado a la misma es de promedio 31.772,36 kWh de energía final al año, al cual se asocian emisiones de 21,36 Ton de CO<sub>2</sub> por edificio, con un ratio de consumo total de energía final por edificio de 9,94 kWh/m<sup>2</sup> año. Si estos datos se extrapolasen a una renovación del 25% del parque escolar edificado andaluz, el impacto sería de 37.118.058.40 kWh de consumo anual, con unas emisiones de 24.961 Ton de CO<sub>2</sub> asociadas. En una vida útil de 30 años, estos edificios renovados estarían consumiendo 1.114.000 Mwh y emitiendo 750.000 Ton de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

La constatación de la inadecuación de estas instalaciones desde el enfoque de la sostenibilidad, de la eficiencia energética y la salubridad, junto con la realidad cultural, económica y sobre todo climática del ámbito de actuación, así como a la forma de uso y funcionamiento de la tipología de edificios, justifica la búsqueda de soluciones alternativas para garantizar la CAI en los edificios escolares de manera sostenible. En este punto se identifican las tecnologías que desarrollan la VN como oportunidad para solventar el problema, poniéndose de manifiesto la falta de regulación normativa y de conocimiento científico aplicado al caso de escuelas en España y Andalucía así como otros países de ámbito mediterráneo.

Por último, se detallan los aspectos que una solución de ventilación debe satisfacer, en cuanto al cumplimiento de las exigencias técnicas recogidas en el marco normativo español y en relación a los sistemas térmicos en los edificios.

**Parámetros normativos.-** En este capítulo se trata la cuestión de la Calidad del Ambiente Interior, en relación a los contaminantes y sus niveles máximos admisibles para uso docente. A su vez, se analiza la UNE EN 13779, que suele usarse para determinar los niveles de CAI en el RITE, observándose que esta norma recomienda por un lado controlar las emisiones de contaminantes antes que incrementar los caudales de ventilación y por otro, identificar los contaminantes específicos que se producen en cada caso. Se recogen también las recomendaciones de la OMS en cuanto a contaminantes reconocidos en general y en los edificios escolares en particular. También se señalan las recomendaciones sobre los elementos a analizar en una campaña de monitorización en edificios escolares.

Se muestra que el CO<sub>2</sub> no se considera como un contaminante en sí mismo, sino un muy buen indicador de la CAI, a través del cual puede conocerse el nivel de ventilación de un espacio y, de manera indirecta, suponer que si no hay una ventilación adecuada, los niveles de contaminantes perjudiciales puede encontrarse por encima de los límites admisibles. La MP tampoco se considera un contaminante por la OMS, aun cuando pueda ser interesante evaluar su concentración. Las investigaciones a las que se hace referencia hallaron que la concentración de MP suele ser mayor en interiores que en exteriores.

Como recomendaciones generales más importantes de la OMS para edificios educativos pueden señalarse las siguientes: i) controlar las fuentes y usar las estrategias de ventilación de manera suplementaria, ii) controlar la contaminación urbana, iii) seleccionar localizaciones sin contaminación ambiental, iv) diseñar edificios con materiales no emisivos, v) eliminar las fuentes de humedad y alergias de los edificios, vi) controlar la ratio de ocupación de las aulas, vii) desacoplar los sistemas de acondicionamiento térmico de los de ventilación, viii) establecer niveles mínimos de ventilación para garantizar la salubridad y ix) informar al usuario de la importancia de controlar la CAI.

## CAPÍTULO 5.-MODELO DE CÁLCULO Y DISEÑO

**Condiciones de funcionamiento.-** Los resultados obtenidos en las pruebas experimentales en dos edificios existentes, se extrapolan a la hipótesis de diseño y cálculo del modelo de edificio escolar estándar.

**SOBRE EL CONSUMO DE ENERGÍA.-** Uno de los principales resultados obtenidos es que el consumo de energía en los edificios escolares en Andalucía es reducido en comparación a los de escuelas en otras localizaciones (es el 50% de la demanda de calefacción en escuelas en Roma y el 6% del consumo anual global de energía en escuelas de primaria y secundaria en el Reino Unido) [4]. Esto se debe fundamentalmente al clima, de inviernos suaves, en los que los consumos de calefacción no son elevados y a que en los centros tipo no se dispone de partida una instalación de aire acondicionado, por el régimen de uso y las condiciones climáticas expuestas en el apartado anterior. Los consumos tipo son muy bajos en comparación con otro tipo de edificios u otras localizaciones (30 kWh/m<sup>2</sup> frente a 280 kWh/m<sup>2</sup>). Según el proyecto Zemeds [5], un edificio escolar de consumo casi nulo es aquél que cumple los requisitos que se recogen en la Fig.1.53, entre los que se encuentran un consumo de energía final menor o igual a 25 kWh/m<sup>2</sup> año. Por tanto, si no se quiere aumentar el impacto de estos edificios en el consumo de energía y su huella de carbono, al menos debe mantenerse el ratio de consumo característico obtenido, no incorporando instalaciones o soluciones constructivas que lo incrementen. Se observa cómo la ventilación tiene un impacto importante en la demanda de consumo de los centros. Siendo un requisito para la salubridad, deben buscarse soluciones de ventilación que no consuman energía. A su vez, es un elemento que puede suponer el 68,8% de las pérdidas de calor en época de refrigeración (-12,6 kWh/m<sup>2</sup>), por lo que el incremento del caudal puede utilizarse como medida pasiva de refrigeración (en la línea de las estrategias identificadas en el Estado del Arte [6,7]). En este apartado se pone también de manifiesto la importancia de las envolventes en la demanda de energía.

**SOBRE CALIDAD DEL AIRE.-** De los resultados obtenidos en la campaña de medidas desarrolladas en el marco de la auditoría global de los centros, se observa lo siguiente:

- **En relación a los contaminantes químicos:**

- i) El mayor nivel de concentración está relacionado con la ocupación. Todos los niveles exteriores se encuentran siempre por debajo de las medidas interiores.
- ii) No existen fuentes emisoras o que están controladas en los edificios
- iii) El CO<sub>2</sub> podrá ser un indicador de la CAI, pero se basa en los parámetros de contaminantes de otro tipo de usos, por lo que ambos datos conjuntamente pueden servir para realizar una nueva calibración.

- **En relación a las partículas:**

- i) Los niveles interiores de MP también se encuentran en interiores por debajo de los límites de referencia
- ii) Se observan niveles interiores superiores a los medidos en el exterior, lo que lleva a pensar que se producen en el interior por la propia actividad de los ocupantes (polvo, tiza, etc...).
- iii) Con los niveles de partículas entrantes medidos, no se requiere filtración de aire al ser los interiores de valor superior. Las estrategias que habrá que llevar a cabo para su eliminación deberán ser limitar las fuentes emisoras y/ la renovación del aire interior con aire exterior.

- **En relación a los niveles de CO<sub>2</sub> y condiciones de ventilación:**

- i) Todos los datos medidos, incluso los valores mayores de concentraciones medidos (4000 ppm) son muy inferiores a los valores que la OMS considera una mala CAI en las aulas.
- ii) El 61,11% de las medidas presentan un promedio de concentración de CO<sub>2</sub> durante la ocupación por debajo del límite de 1500 ppm.
- iii) La ocupación es variable y por tanto la concentración de CO<sub>2</sub>. Si se realizan estrategias de ventilación en base a este parámetro, los niveles deben ser variables
- iv) Con prácticas de ventilación a una cara se produce la renovación del aire interior de manera eficaz, y estos resultados mejoran utilizando estrategias de ventilación cruzada.

**SOBRE LA EFICACIA DE LOS SISTEMAS DE VENTILACIÓN.-** Se verifica la eficacia del SVN del Edificio A en la renovación del aire interior quedando la temperatura interior está dentro de niveles aceptables. Las condiciones de confort no se ven afectadas a pesar de la introducción del aire del exterior, permaneciendo la temperatura interior

prácticamente inalterable, mientras que se consigue un descenso del nivel de CO<sub>2</sub>. Con suficiente inercia térmica de la edificación, la temperatura no sufre cambios mientras se renueva el aire.

Por tanto, diseñando un sistema en el que se eviten las corrientes de aire, se debe poder realizar un balance energético entre un SVM con recuperación de calor (consumidor de energía eléctrica) y un SVN (que no consume energía para su funcionamiento) para demostrar que se consume menos energía con el SVN, aun cuando haya que considerar la renovación del aire como una “carga negativa” para el sistema de calefacción.

**Cálculo y diseño del SVN.-** En este capítulo se ha detallado el cálculo y el diseño de un SVN estándar para incorporar en el diseño del aula de los edificios escolares, como medio para garantizar la CAI durante la ocupación. Mediante simulaciones de cálculo realizadas sobre un edificio escolar prototipo se demuestra en el ámbito geográfico de estudio, que este edificio funcionando con VN consume menos energía que el mismo en las mismas condiciones funcionando con VM. Los resultados arrojan un valor promedio de ahorro del entorno del 18%, y del 33% en términos de energía final y primaria respectivamente. Se ha estimado también en valores absolutos, que es posible ahorrar en un edificio escolar 14.600 kWh por año (energía final) mediante el simple reemplazo del SVM por un SVN. En cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub>, el promedio de reducción anual de emisiones estimado supera los 9.300 kg. También se ha comprobado que es posible controlar adecuadamente la CAI en los espacios dotados de VN, eliminando los contaminantes de manera adecuada y con suficientes renovaciones de aire, utilizando el módulo de simulación CFD.

Estos resultados son similares a los obtenidos en otros estudios publicados. Por ejemplo, Schulze y Eicker [8] analizaron diferentes diseños de sistemas de VN en tres ubicaciones diferentes con el enfoque del confort térmico, la refrigeración pasiva y el ahorro de energía en época de verano. En este estudio analizan la ventilación cruzada y la VN utilizando el efecto chimenea. Stazi et al. [9] estudiaron en la operación de ventanas automáticas en un aula escolar. Mostraron en sus conclusiones que pueden garantizar el confort térmico reduciendo los niveles de CO<sub>2</sub> en las aulas. Comparado con este estudio, mientras que Stazi et al. comprobaron que la eficiencia del sistema era mejor en días ventosos, el sistema propuesto en este documento, que combina ventanas superiores con “shunts” para favorecer la ventilación cruzada en combinación con el efecto chimenea, mejora la solución por el efecto “stack” con independencia de la fuerza del viento.

Schulze y Eicker analizan también los SVN para su utilización en estrategias de refrigeración pasiva [8]. En su análisis comparan la VN controlada con la refrigeración mecánica, obteniendo ahorros de energía para tres ubicaciones de 13 a 44 kWh/m<sup>2</sup> anuales de energía neta en refrigeración. Cook y Short [10] también enfocan sus estudios en este sentido realizando simulaciones termodinámicas y cálculo CFD para el diseño de varios edificios no residenciales con diferentes estrategias de refrigeración pasiva.

Otros estudios publicados recientemente, como el de Nomura y Hiyama [11] en edificios de oficinas japoneses, destacan cómo la efectividad del sistema depende del diseño. Martins y Carrilho da Graça [12], utilizaron Energyplus para analizar el potencial de la VN en cinco ubicaciones en California, mostrando que con el uso de la VN los ahorros HVAC pueden estar entre 25-80%. Lo que muestra que los resultados obtenidos en este estudio y las estimaciones realizadas se encuentran dentro del marco actual de I+D en VN y la aplicación específica desarrollada muestra un enorme potencial de ahorro de energía y emisiones de CO<sub>2</sub>.

Finalmente, la traslación realizada del modelo de cálculo al modelo estándar de aplicación se ha basado en criterios de simplicidad y operatividad (simplicidad de diseño y facilidad de mantenimiento), así como a criterios objetivos relativos teniendo en cuenta las condiciones reales y la viabilidad del diseño, construcción y uso.

## CAPÍTULO 6.- CASO DE ESTUDIO

**Implantación del sistema. Edificio test.-** En este Capítulo se presenta y describe la experiencia realizada sobre un edificio escolar en el que se han dispuesto dos sistemas de ventilación, mecánica y natural para analizar comparativamente su funcionamiento y validar el funcionamiento del SVN diseñado en los Capítulos anteriores. Como resultado preliminar se obtiene que la inversión que es necesario realizar para implantar un SVM

es 4 veces superior al coste de la instalación del SVNI en cada una de las aulas, estimándose que el coste total de la inversión y el mantenimiento y funcionamiento durante una vida útil a 30 años asciende a la cantidad de 401.260 euros. En cuanto a las tareas de mantenimiento del SVM, debe realizarse la revisión y limpieza de filtros y conductos 3 veces al año. En relación al consumo de energía y la emisión de CO<sub>2</sub>, se prevé en 30 años el consumo de 1.247.093 kWh de energía final, 2.265.510,60 kWh de energía primaria, y la emisión de 792.436,2 kg de CO<sub>2</sub>. En el caso concreto de este edificio, el consumo asociado al funcionamiento del SVM es de edificio es de 9,53 kWh/m<sup>2</sup> año. Si comparamos con el consumo estimado para un edificio tipo (según el análisis del Capítulo 4), que se cuantificaba en 30 kWh/m<sup>2</sup>, se estaría incrementando el consumo del edificio más de un 30% sobre el estándar, sólo debido al funcionamiento de esta instalación, alejándose por tanto del objetivo marcado por el proyecto Zemeds [5] de 25 kWh/m<sup>2</sup> año para edificios escolares de consumo casi nulo en el ámbito mediterráneo.

Por tanto, en este escenario se pone de manifiesto que la solución de ventilar mecánicamente un edificio escolar no es viable ni sostenible, siendo necesaria una solución alternativa como la que se propone, que se valida en el último apartado.

**Validación. Campaña de medidas en el edificio test.-** Las conclusiones que se obtienen en este capítulo son diversas. Por un lado, se observa cómo la ocupación del aula es discontinua, intermitente y variable y no permanente, no siguiendo una pauta constante ni igual para todas las aulas ni para todos los días, por lo que el sistema de ventilación debe adecuarse a la misma. Un sistema basado en la concentración de CO<sub>2</sub> puede ser válido en este sentido. Para esto, el tipo de control del SVM proyectado se muestra inadecuado, ya que no se adapta a la ocupación, sino que funciona con una programación horaria, que resulta poco flexible en función del tipo de organización de los centros escolares y del equipo humano del que disponen los centros educativos.

Los niveles de CO<sub>2</sub> se muestran directamente relacionados con el grado de ocupación del espacio y su nivel de ventilación. No existen diferencias aparentes entre las aulas de infantil y primaria ni en el patrón de funcionamiento ni en la concentración de sustancias conocidas. Se aprecia un mayor nivel de CO<sub>2</sub> en el caso de primaria, probablemente debido al mayor tamaño de los alumnos, por su relación con el volumen y el peso de las personas. En cualquier caso, los niveles alcanzados, tanto máximos como promedios se encuentran dentro de los rangos considerados como referencia de la norma inglesa (BB101). Por otro lado, se comprueba que utilizando el sistema de ventanas inteligentes se obtienen niveles de CO<sub>2</sub> adecuados. Así mismo, la operación del SVNI no afecta a la temperatura interior medida en las aulas. En cuanto a la sensación manifestada de falta de confort en momentos puntuales por parte del usuario puede deberse a la posición de la ventana, que en este caso particular, aun cuando está por encima de la zona de ocupación sentado, no se encuentra en la zona más alta del paramento.





## **CAPÍTULO 8\_CONCLUSIONES**

**MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS EDIFICIOS DE USO EDUCATIVO EN CLIMA MEDITERRÁNEO:  
Aplicación práctica de diseño y cálculo de Sistemas de Ventilación Natural**



## **CAPÍTULO 8.- CONCLUSIONES**

### **1.- Conclusiones y aportaciones**

### **2.- Propuestas de mejora y futuras líneas de investigación**

En este Capítulo se resumen las principales conclusiones alcanzadas en esta tesis doctoral así como las posibles vías de continuación de este trabajo, con propuestas de mejora del sistema diseñado y nuevas líneas de investigación.

## 1.- Conclusiones y aportaciones

Desde el enfoque complejo de la sostenibilidad en Arquitectura, que puede ser abordado desde diversas ópticas, la presente tesis doctoral identifica falta de conocimiento y desarrollo normativo en el ámbito de la Ventilación Natural y profundiza en el estudio de su idoneidad, eficiencia y viabilidad en el marco de los edificios de uso docente.

La principal conclusión de la investigación es que los Sistemas de Ventilación Natural son adecuados en estrategias pasivas de acondicionamiento ambiental en espacios interiores de edificios de uso docente para garantizar óptimos niveles de Calidad del Aire y de Confort. Los SVN se han identificado como recursos de diseño Bioclimático que pueden formar parte de un conjunto de soluciones para mejorar la sostenibilidad de estos edificios a corto, medio y largo plazo, al reducir el consumo de energía, garantizar la salubridad de los espacios minimizando los riesgos derivados de la posible falta de mantenimiento de los sistemas mecánicos y minimizar los gastos de mantenimiento.

La contribución de esta tesis se materializa concretamente en el desarrollo de una base teórica y experimental para la configuración de estrategias de diseño y sistemas específicos en los edificios docentes de la zona mediterránea, con el objetivo de reducir la huella de carbono asociada a los SVM y a los sistemas de refrigeración, formando parte del conjunto de estrategias a utilizar en el diseño de edificios de consumo casi nulo

Utilizando SVN para controlar la CAI en las aulas, pueden obtenerse, en clima mediterráneo, ahorros en el consumo de energía entre el 18% y el 31% con respecto a la utilización de SVM. Otras ventajas adicionales son la mejora de la salubridad de los recintos, reduciendo los problemas asociados al “síndrome del edificio enfermo”, la reducción de los costes de inversión inicial, funcionamiento y mantenimiento a lo largo de la vida útil del edificio, así como una menor dependencia del suministro de energía, estado de las redes, precios de los combustibles, etc....

Se han cumplido los objetivos planteados en el Capítulo 2, específicamente:

Contribuyendo al conocimiento de estrategias pasivas alineadas con los principios de la arquitectura bioclimática, con el objeto de diseñar los edificios de uso educativo de manera consciente en relación con el clima y las condiciones de la ubicación territorial y geográfica, más respetuosos con los recursos disponibles y su forma de utilización, y garantizando su autonomía en situaciones de posibles fluctuaciones en el suministro o el coste de la energía. La investigación se ha desarrollado teniendo en cuenta la tipología de este tipo de edificios y sus especificidades, así como sus características constructivas, particularidades de mantenimiento, patrón de funcionamiento y régimen de uso a lo largo de su vida útil. Se han proporcionado soluciones específicas para el sur de Europa y el clima mediterráneo, adecuadas a sus características climatológicas que no proceden de estudios heredados de otros climas.

Se ha identificado la inexistencia de prescripciones o desarrollo normativo sobre técnicas de diseño de VN en edificación en España, proponiendo una solución concreta a través de un modelo diseñado y dimensionado con herramientas de simulación, aplicado al caso uso docente en clima mediterráneo. Con esta solución se garantiza el cumplimiento de las exigencias técnicas que establece la normativa en relación a la reducción de la huella de carbono de los edificios (consumos de energía y emisiones de CO<sub>2</sub>) y el diseño de edificios de consumo de energía casi nulo, a la vez que los aspectos de salubridad y CAI, considerando todos los parámetros relacionados con la vida útil de los edificios, demostrando la reducción de costes de inversión inicial y mantenimiento, teniendo en cuenta el carácter ejemplarizante de las administraciones públicas.

Con la solución propuesta se pretende potenciar la incorporación de soluciones de diseño pasivo en los edificios escolares andaluces para mejorar la CAI y como refrigeración pasiva, siguiendo las pautas de las DE en cuanto al diseño de los edificios en función de su localización y el clima específico. Cabe mencionar que este sistema se encuentra incorporado en los proyectos de 15 nuevos centros educativos que se construirán en los próximos años.

El SVNI que se diseña avanza sobre otros estudios que proponen la utilización de ventanas automáticas, al combinar la actuación de la ventilación cruzada con el efecto chimenea proporcionado por los “shunts” conectados a cubierta que se disponen en cada aula. Finalmente, la traslación realizada del modelo de cálculo al modelo estándar

de aplicación se ha basado en criterios de simplicidad y operatividad (simplicidad de diseño y facilidad de mantenimiento), así como a criterios objetivos relativos a las condiciones reales y la viabilidad del diseño, construcción y uso.

Con el SVN se da respuesta a las exigencias técnicas de la normativa española (LOE y RITE). Además, aunque el enfoque de la investigación se centra fundamentalmente en los SVN como sistemas de renovación del aire para garantizar la CAI, estos sistemas presentan la ventaja adicional de poder reducir la demanda de refrigeración y el consumo eléctrico asociado si se utilizan para llevar a cabo estrategias de refrigeración pasiva y de ventilación nocturna.

## 2.- Propuestas de mejora y futuras líneas de investigación

### 1. Propuestas de mejora

En cuanto a los aspectos de mejora, se ha identificado durante el análisis del caso práctico (Capítulo 6) que la sensación de confort del usuario puede verse mejorada ubicando las ventanas inteligentes en un nivel superior y siempre fuera del ámbito de la zona de ocupación. Además, el usuario debe poder interactuar con el sistema, para que sea consciente de sus beneficios e incluya su utilización en sus rutinas, ya que si no es de este modo, el sistema está destinado a quedar obsoleto y sin uso (como se ha comprobado que sucede con los SVM). Debe tenerse en cuenta que, en general, el usuario no está familiarizado con los sistemas de ventilación ni es consciente de su importancia, más allá de la práctica tradicional. Existen muchas circunstancias que influyen en el nivel de aireación del aula, no sólo los sistemas de ventilación de que disponga el edificio, sino la actividad del propio usuario. Por último, los elementos de control y medida deben ser correctamente calibrados y ajustados al funcionamiento del edificio.

Teniendo en consideración las observaciones de la implementación del sistema en el edificio test, para los nuevos edificios escolares en los que se incluyan estos SVN debe tenerse en consideración en la redacción del proyecto:

- La disposición de las ventanas automáticas en la parte superior del paramento, alcanzando el nivel del techo, para favorecer el efecto “coanda” y minimizar la posible sensación de corriente de aire que pueda apreciar el usuario si este entra a un nivel inferior.
- Las ventanas automáticas siempre deben poder ser accionadas por el usuario, tanto para cerrarlas en el caso de que lo consideren oportuno, como para accionarlas a voluntad aun cuando el nivel de CO<sub>2</sub> no haya alcanzado el límite configurado. Esta posibilidad de actuación debe ir acompañada de dispositivos luminosos que indiquen la concentración de CO<sub>2</sub> en relación a la CAI del aula, para avisar al usuario de esta circunstancia. (Aquí se entiende el profesor/a, persona adulta responsable del aula en cada momento).
- El sistema debe ser lo más sencillo posible, de manera que se garantice la correcta operación y funcionamiento. En este sentido, la mayor facilidad de calibración de las sondas, así como la menor necesidad de interacción de especialistas con el sistema es determinante.

### 2. Futuras líneas de investigación

Como principal conclusión se ha confirmado la viabilidad de utilización de los SVN como sistemas pasivos para obtener una adecuada Calidad del Aire. Así mismo, su mejor desempeño lleva asociadas otras posibles medidas, que pueden ser objeto de futuras investigaciones. De este modo, pueden abrirse nuevas líneas de investigación centradas en otros usos edificatorios, extrapolándose las conclusiones del presente trabajo al diseño de edificios de uso comercial, industrial, administrativo, residencial, sanitario... etc.

Así mismo, cabe señalar que en la presente tesis doctoral se ha profundizado en la utilización de la VN como estrategia para garantizar la CAI, mencionándose el papel que pueden desempeñar estos sistemas como estrategias de refrigeración pasiva. El desarrollo de esta otra línea de investigación presenta un gran interés en el escenario actual de cambio climático, con el previsible incremento de las temperaturas a nivel mundial, junto con la exigencia de la reducción de los consumos de energía y de la emisión de los gases de efecto invernadero que se le asocian. Este será uno de los temas a investigar en el proyecto “Ecoeficiencia en Centros Educativos: innovación, rehabilitación y regeneración” adjudicado en la Convocatoria en Concurrencia Competitiva de Proyectos de I+D+I en el marco del Programa Operativo Feder Andalucía 2014-2020, en el que la doctoranda participa como investigadora y cuya investigadora responsable es la tutora de la Tesis Ángela Barrios Padura.



Por último, también se ha apuntado en el documento sobre la oportunidad que puede suponer el desarrollo de esta tecnología en Andalucía, tanto para empresas especializadas en las soluciones comerciales (instaladores, comercializadores...), como en el ámbito de la consultoría técnica y el diseño de edificios. Junto con esto, el impulso de su desarrollo en el ámbito de la investigación y a nivel comercial podría permitir a Andalucía constituirse en pionera en materia de arquitectura bioclimática, siendo fundamental para ello que se conozcan los principios de funcionamiento y dimensionamiento de los SVN, por lo que las acciones de difusión y formación en este ámbito se constituyen como necesidades básicas para obtener un nivel de competencia adecuada entre los agentes implicados y un grado suficiente de integración en los edificios.

## **CAPÍTULO 9\_TRANSFERENCIA DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN**

**MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS EDIFICIOS DE USO EDUCATIVO EN CLIMA MEDITERRÁNEO:  
Aplicación práctica de diseño y cálculo de Sistemas de Ventilación Natural**



## **CAPÍTULO 9.- TRANSFERENCIA DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN**

- 1. Presentaciones y comunicaciones**
- 2. Publicaciones**
- 3. Otros**
- 4. Proyecto de investigación al que se adscribe parcialmente el trabajo**

En este último capítulo se realiza un resumen de las actividades, directamente relacionadas con esta tesis doctoral que se han llevado a cabo como parte del proceso transversal de difusión de los resultados de la investigación y transferencia del conocimiento. Como se ha ido mencionando en los distintos capítulos, parte del contenido y datos recogidos en las publicaciones forman parte de este documento de tesis doctoral.

## 1.- Presentaciones y comunicaciones

En este apartado se incluyen las presentaciones en congresos. Se diferencia entre aquéllas que han sido aceptadas, entregadas y presentadas por la autora, las que han sido aceptadas y entregadas, pero no han sido presentadas por la autora, y las que se aceptó el abstract pero finalmente no fueron presentadas en el congreso. De alguna de ellas han derivado publicaciones posteriores, bien en el libro de actas del congreso, o en publicaciones "on line" asociadas, bien en revistas con revisión por pares, con entidad de artículo propiamente dicho.

### 1.1 Presentaciones en congresos

- 11th Conference on sustainable development of energy, water and environment systems. Sdewes Centre.  
<http://www.lisbon2016.sdewes.org/>  
"Natural Ventilation Systems in 21st century Zero Energy Buildings"  
Presentado por la autora
- International conference on advances in energy systems and environmental engineering (ASEE17). Wroclaw University of Science and Technology (Poland). The University of New Mexico (USA). Brunel University London (UK).  
<http://www.asee17.wis.pwr.edu.pl/>  
"Natural Ventilation Systems to enhance sustainability in buildings: a review towards Zero Energy Buildings in schools"  
Presentado por la autora
- 38th AIVC - 6th TightVent & 4th venticool Conference, 2017 Ventilating healthy low-energy buildings. University Of Nottingham. International Network on Ventilation and Energy Performance (INIVE) on behalf of the Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC), TightVent Europe (the Building and Ductwork Airtightness Platform), and venticool (the international platform for ventilative cooling. Brunel University London. The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE).  
<http://www.aivc2017conference.org>  
"Natural ventilation systems in Mediterranean schools. A prototype experience in Andalusia as an alternative to mechanical ventilation"  
Presentado por la autora
- IV Congreso Edificios de Energía Casi Nula .Grupo Tecmared. Secretaría de Estado para la Sociedad de la Información y la Agenda Digital, SESIAD – Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital.  
<http://www.congreso-edificios-energia-casi-nula.es/>  
"Potencial de los sistemas de ventilación natural pasiva en la reducción del consumo eléctrico. Proyecto piloto en un colegio en Andalucía"  
No presentado por la autora
- 12th Conference on sustainable development of energy, water and environment systems. Sdewes Centre.  
<http://www.dubrovnik2017.sdewes.org>  
"Passive actions in building envelope to enhance sustainability in Mediterranean climate. Application to school buildings"  
Presentado por la autora

### 1.2 Comunicaciones en congresos

- "Natural Ventilation Systems in 21st century Zero Energy Buildings". (autor principal)  
11th Conference on sustainable development of energy, water and environment systems. Sdewes Centre.  
<http://www.lisbon2016.sdewes.org/>

- “Natural Ventilation Systems to enhance sustainability in buildings: a review towards Zero Energy Buildings in schools”. (autor principal)  
International conference on advances in energy systems and environmental engineering (ASEE17). Wroclaw University of Science and Technology (Poland). The University of New Mexico (USA). Brunel University London (UK). <http://www.asee17.wis.pwr.edu.pl/>
- “Natural ventilation systems in Mediterranean schools. A prototype experience in Andalusia as an alternative to mechanical ventilation”. (autor principal)  
38th AIVC - 6th TightVent & 4th venticoool Conference, 2017 Ventilating healthy low-energy buildings. University Of Nottingham. International Network on Ventilation and Energy Performance (INIVE) on behalf of the Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC), TightVent Europe (the Building and Ductwork Airtightness Platform), and venticoool (the international platform for ventilative cooling. Brunel University London. The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE). <http://www.aivc2017conference.org/>
- “Passive actions in building envelope to enhance sustainability in Mediterranean climate. Application to school buildings”. (autor principal)  
12th Conference on sustainable development of energy, water and environment systems. Sdewes Centre. <http://www.dubrovnik2017.sdewes.org/>
- “Potencial de los sistemas de ventilación natural pasiva en la reducción del consumo eléctrico. Proyecto piloto en un colegio en Andalucía”. (autor principal)  
IV Congreso Edificios de Energía Casi Nula .Grupo Tecmared. Secretaría de Estado para la Sociedad de la Información y la Agenda Digital, SESIAD – Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital. <http://www.congreso-edificios-energia-casi-nula.es/>
- SDEWES2018-0205 “Air Quality in schools and its relationship with building design, HVAC systems and urban location”. (autor principal)  
Sdewes 2018 Palermo. Sdewes Centre. <http://www.palermo2018.sdewes.org/>
- SDEWES2018-0218 Evaluation of Health and Wellbeing of Mediterranean Schools through. Air Pollutants Concentration Measurements. (autor no principal)  
Sdewes 2018 Palermo. Sdewes Centre. <http://www.palermo2018.sdewes.org/>

### 1.3 Abstracts aceptados

- “Study of Ventilative Cooling potential to reduce air conditioning demand in Mediterranean schools”. (abstract y aceptación). (autor principal)  
39th AIVC - 7th TightVent & 5th venticoool Conference Smart ventilation for buildings. University Of Nottingham. International Network on Ventilation and Energy Performance (INIVE) on behalf of the Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC), TightVent Europe (the Building and Ductwork Airtightness Platform), and Venticoool (the international platform for Ventilative Cooling. Brunel University London. The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE). <http://aivc2018conference.org/>



## 2.- Publicaciones

Las publicaciones realizadas durante el desarrollo de esta tesis doctoral y en relación a la materia de investigación son las siguientes:

### 2.1 Autor principal en revistas indexadas

- “Natural ventilation systems in 21st-century for near zero energy school buildings” (Gil-Baez, Barrios-Padura, Molina-Huelva, & Chacartegui, 2017). Energy. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.188>  
(25 citas Scopus)
- “Passive actions in the building envelope to enhance the sustainability of schools in Mediterranean climate” (Gil-Baez, Padura, & Huelva, 2019). Energy. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.094> (9 citas Scopus)

### 2.2 Autor principal en otras publicaciones

- “Natural Ventilation Systems to enhance sustainability in buildings: a review towards Zero Energy Buildings in schools” (Gil-Baez, Barrios-Padura, & Molina-Huelva, 2017). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172200053>  
(2 citas Scopus)
- “Natural Ventilation Systems in Mediterranean Schools. A prototype experience in Andalusia as an alternative to mechanical ventilation” (Gil-Báez, Barrios-Padura, Molina-Huelva, & Roldán-Vendrell, 2017). ISBN: 9782930471518
- “Potencial de los sistemas de ventilación natural pasiva en la reducción del consumo eléctrico. Proyecto piloto en un colegio en Andalucía” (Congreso, Energ, & Nula, 2017). ISBN: 9781973163398

### 2.3 Autor no principal

- “La eficiencia energética en las escuelas y el papel de la comunidad educativa” (Barrios-Padura, Molina-Huelva, Lizana, Serrano-Jiménez, & Gil, 2017). Aula Verde (Consejería de Educación y Consejería de Medioambiente y Ordenación del Territorio). Nº 44. Compromiso social y cambio global. Mayo 2017 ISSN: 1132-8444
- “Identification of potential indoor air pollutants in schools” (Lizana et al., 2020). Journal of Cleaner Production. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118420>
- LIBRO CLIMACT (pte de publicarse)

### 3.- Otros

- “La investigación como buena práctica. La investigación en el ámbito de las construcciones escolares”. Jornada formativa Agencia Pública Andaluza de Educación. Consejería de Educación. Ponente. 19.04.2017. APAE. <http://www.iseandalucia.es/web/guest>
- Revisora de artículo por pares EGY-D-17-03806R1. Revisora invitada por la revista Energy para revisar un artículo por pares. Octubre 2017. Energy. Editorial Elsevier
- Invitación como experto. Participación en comité de expertos del Instituto Torroja para DIT de homologación de un sistema de ventilación higrorregulable en viviendas. Octubre 2017. CSIC- Instituto Eduardo Torroja
- Conferencia temática 1: “La Agencia Pública Andaluza de Educación en el proyecto ClimACT. Nuevas propuestas de gestión de la calidad del aire en centros educativos”. Ponente. 19.12.2017. Equipo ClimACT USE.
- Esta experiencia se encuentra incluida en la Estrategia Energética de Andalucía 2020 de la Consejería de Empleo, Empresa y Comercio (Consejería de Empleo, Empresa y Comercio, n.d.), con la acción GA\_3\_2

## 4.- Proyecto de investigación al que se adscribe el trabajo

El presente estudio se ha desarrollado parcialmente dentro del marco del proyecto ClimAct ("ClimAct. Transition to a low carbon economy in schools," 2017), financiado por el programa Interreg Sudoe ("INTERREG-SUDOE," n.d.), dentro del eje 3 "Economía baja en carbono", con el objetivo 4C1: "Mejorar las políticas de eficiencia energética en los edificios públicos y viviendas a través de la puesta en marcha de redes y la experimentación conjunta". Los sectores que ha abordado han sido: 1. utilización de las energías renovables en los edificios públicos y 2. Mejora de la eficiencia energética.

El ámbito temporal de desarrollo ha sido 2016-2019 y su objetivo principal promover la transición a una economía baja en carbono en los edificios escolares.

El grupo de socios que han desarrollado el proyecto ha estado constituido por Universidades y organismos de investigación de la zona Sudoe.

- Instituto Superior Técnico Lisboa <https://tecnico.ulisboa.pt>
- Instituto de Soldadura e Qualidade. PT
- EDIGREEN - Soluções Energéticas, Lda. PT
- Associação Bandeira Azul da Europa. PT
- Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas. ES
- Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Departamento de Ingeniería Energética. ES
- Université de La Rochelle. FR
- Ville de La Rochelle. FR
- University of Gibraltar. UK

En el ámbito del desarrollo de este proyecto se ha participado tanto en el diseño de la campaña de medidas y la selección de centros, como en la toma de datos "in situ" y el desarrollo de las auditorías de los centros. Así mismo se ha colaborado en la propuesta de soluciones específicas para alcanzar el objetivo del proyecto de investigación en cuanto a la identificación de recursos para la mejora y reducción de la huella de carbono de los centros escolares. Así mismo se ha participado en las actividades formativas y de difusión relacionadas con el proyecto así como en las publicaciones asociadas al mismo, al igual que se ha colaborado en la divulgación de los resultados obtenidos de la investigación. Finalmente se encuentra en las últimas fases de desarrollo un libro en el que se compendian las distintas experiencias realizadas entre las que se encuentran los diseños de SVN.



## Bibliografía

## Capítulo 1

- Aboulnaga, M., & Moustafa, M. (2016). Sustainability of higher educational buildings. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 1(28). <https://doi.org/10.1051/rees/2016016>
- Active House. (n.d.). Retrieved from <https://www.activehouse.info/>
- Aflaki, A., Mahyuddin, N., Al-Cheikh Mahmoud, Z., & Baharum, M. R. (2015). A review on natural ventilation applications through building facade components and ventilation openings in tropical climates. *Energy and Buildings*, 101, 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.033>
- Ahmad, T., Thaheem, M. J., & Anwar, A. (2017). Developing a green-building design approach by selective use of systems and techniques, 2007(February), 28–50. <https://doi.org/10.1080/17452007.2015.1095709>
- Ahmadkhani Maleki, B. (2011). Shading: Passive cooling and energy conservation in buildings. *International Journal on International Organization on TPE ( IOTPE )*, 3(9), 72–79.
- AIVC. (2018). AIVC | Air Infiltration and Ventilation Centre. Retrieved March 22, 2017, from <http://www.aivc.org/>
- AIVC Conference 2018. (n.d.). Retrieved from <http://aivc2018conference.org/>
- Al-hemoud, A., Al-awadi, L., Al-rashidi, M., Abdul, K., Al-khayat, A., & Behbehani, W. (2017). Comparison of indoor air quality in schools : Urba vs . Industrial ' oil & gas ' zones in Kuwait. *Building and Environment*, 122, 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.001>
- Allard, F., Santamouris, M. (Matheos), Alvarez, S., European Commission. Directorate-General for Energy., & ALTENER Programme. (1998). *Natural ventilation in buildings: a design handbook*. London: James and James (Science Publishers) Ltd.
- Allocca, C., Chen, Q., & Glicksman, L. R. (2003). Design analysis of single-sided natural ventilation. *Energy and Buildings*. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00239-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00239-6)
- Almeida, R. M. S. F., & de Freitas, V. P. (2015). IEQ Assessment of Classrooms with an Optimized Demand Controlled Ventilation System. *Energy Procedia*, 78, 3132–3137. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.769>
- Almeida, R. M. S. F., & De Freitas, V. P. (2014). Indoor environmental quality of classrooms in Southern European climate. *Energy and Buildings*, 81, 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.020>
- Almeida, R. M. S. F., Ramos, N. M. M., & Freitas, V. P. De. (2016). Thermal comfort models and pupils ' perception in free-running school buildings of a mild climate country. *Energy & Buildings*, 111, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.066>
- Álvarez, S., Cabeza, L. F., Ruiz-pardo, A., Castell, A., & Antonio, J. (2013). Building integration of PCM for natural cooling of buildings. *Applied Energy*, 109, 514–522. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.080>
- American Society of Heating refrigerating and air conditioning engineers. ASHRAE STANDAR 55-2004. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 2004 § (2004).
- Argiriou, A. A., Balaras, C. A., & Lykoudis, S. P. (2002). Single-sided ventilation of buildings through shaded large openings. *Energy*, 27(2), 93–115. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00058-5](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00058-5)
- Asfour, O. S., & Gadi, M. B. (2008). Using CFD to investigate ventilation characteristics of vaults as wind-inducing devices in buildings. *Applied Energy*, 85, 1126–1140. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.10.015>
- ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (n.d.). Retrieved March 22, 2017, from <https://www.ashrae.org/>
- ASHRAE. ASHRAE STANDAR 62.1 (Ventilación para una Calidad Aceptable de Aire Interior), 2007 § (2009).
- ASHRAE Standing Standard Project Committee 55. (2011). *ASHRAE STANDARD 55-2010 (Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy)* (Vol. 2010).
- Aslani, A., Bakhtiar, A., & Hadi, M. (2019). Energy-efficiency technologies in the building envelope: Life cycle and adaptation assessment, 21(March 2018), 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.09.014>
- Associations, A., Brelih, N., & Goeders, G. (2012). *Healthvent Final report*.
- Attia, S., & Carlucci, S. (2015). Impact of Different Thermal Comfort Models on Zero Energy Residential Buildings in Hot Climate. *Energy and Buildings*, 102, 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.017>
- Awbi, H. B. (2008). *Ventilation systems: design and performance*. London : Taylor & Francis.
- Awbi, H. B. (Hazim B. . (2008). *Ventilation systems: design and performance*. London : Taylor & Francis.
- Awbi, Hazim B. (1998). Chapter 7-Ventilation. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2, 157–188.
- Badescu, V., Laaser, N., & Crutescu, R. (2010). Warm season cooling requirements for passive buildings in Southeastern Europe (Romania). *Energy*, 35(8), 3284–3300. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.013>
- Bahadori, M. N. (1978). Passive Cooling Systems in Iranian Architecture, 144–155.
- Bakó-bíró, Z., Clements-croome, D. J., Kochhar, N., Awbi, H. B., & Williams, M. J. (2011). Ventilation rates in schools and pupils ' performance. *Building and Environment*, 48, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.018>
- Balocco, C., & Grazzini, G. (2010). *Cool power natural ventilation systems in historic buildings*. New York : Nova

- Science Publishers.
- Balogun, A. A., Morakinyo, T. E., & Adegun, O. B. (2014). Effect of tree-shading on energy demand of two similar buildings. *Energy and Buildings*, 81, 305–315. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.046>
- Barbadilla-Martín, E., Manuel, J., Lissén, S., Martín, J. G., Aparicio-ruiz, P., & Brotas, L. (2017). Field study on adaptive thermal comfort in mixed mode office buildings in southwestern area of Spain. *Building and Environment*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.042>
- Barbason, M., & Reiter, S. (2014). Coupling building energy simulation and computational fluid dynamics: Application to a two-storey house in a temperate climate. *Building and Environment*, 75, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.012>
- Barrett, P., Davies, F., Zhang, Y., & Barrett, L. (2015). The impact of classroom design on pupils learning: Final results of a holistic, multi-level analysis. *Building and Environment*, 89, 118–133. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.013>
- Bastani, A., Haghighat, F., & Kozinski, J. (2015). Designing building envelope with PCM wallboards: Design tool development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31(2014), 554–562. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.031>
- Ben-david, T., Waring, M. S., Ben-david, T., & Waring, M. S. (2016). Impact of natural versus mechanical ventilation on simulated indoor air quality and energy consumption in offices in fourteen. *Building and Environment*, 104(June), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.007>
- Birtles, A. B., Kolokotroni, M., & Perera, M. D. A. E. S. (1996). Night cooling and ventilation design for office-type buildings. *Renewable Energy*, 8(1–4). [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88858-6](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88858-6)
- BRANZ Ltd for the Ministry of Education. (2007). Designing Quality Learning Spaces : Ventilation & Indoor Air Quality, ISBN: 0-47.
- BRE (Building Research Stablistment). (n.d.). Retrieved from <https://bregroup.com/Breathing Buildings>. (n.d.).
- BREEAM. (n.d.). Retrieved March 23, 2017, from <http://www.breeam.com/>
- BUILD UP. The European Portal for Energy Efficiency in Buildings. (n.d.). Retrieved from <http://www.buildup.eu/en/explore/links/european-collaborative-action-eca-urban-air-indoor-environment-and-human-exposure>
- Building schools in the 21st century and Current thinking about learning for a lifetime*. (2009).
- C. Godwin, & Batterman, S. (2007). Indoor air quality in Michigan schools. *Indoor Air*, 17, 109–121. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2006.00459.x>
- Campano, M. Á. (2015). *Confort térmico y eficiencia energética en espacios con alta carga interna climatizados: aplicación a espacios docentes no universitarios en Andalucía*.
- Carlos, J. S., & Corvacho, H. (2010). Retrofit measures in old elementary school buildings towards energy efficiency. *Journal of Civil Engineering and Management*, 16:4, 567–576. <https://doi.org/10.3846/jcem.2010.63>
- Carmen María Calama-González, Rafael Suárez, Á. L. L.-R. (2018). Thermal and lighting consumption savings in classrooms retrofitted with shading devices in a hot climate. *Energies*, 11, 17. <https://doi.org/10.3390/en11102790>
- Carrer, P., de Oliveira Fernandes, E., Santos, H., Hänninen, O., Kephelopoulous, S., & Wargocki, P. (2018). On the development of health-based ventilation guidelines: Principles and framework. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/ijerph15071360>
- Carrilho, G., & Linden, P. (2016). Ten questions about natural ventilation of non-domestic buildings. *Building and Environment*, 107, 263–273. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.007>
- Catalina, T., & lordache, V. (2012). IEQ assessment on schools in the design stage. *Building and Environment*, 49, 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.09.014>
- CE3X. (n.d.). <https://doi.org/https://www.efinova.es/CE3X>
- Certificación VERDE. (n.d.). Retrieved from <http://gbce.es/certificacion-verde/>
- Chappells, H., & Shove, E. (2005). Debating the future of comfort: environmental sustainability , energy consumption and the indoor environment, 3218(33(1)), 32–40. <https://doi.org/10.1080/0961321042000322762>
- Chartered Institution of Building Services Engineers. (2014). *Natural ventilation in non-domestic buildings*. Chartered Institution of Building Services Engineers.
- Chatzidiakou, L., Mumovic, D., & Summerfield, A. (2015). Is CO2 a good proxy for indoor air quality in classrooms? Part 1: The interrelationships between thermal conditions, CO2 levels , ventilation rates and selected indoor pollutants. *Journal of Buildings Services Engineering Research & Technology*, 36(2), 129–161. <https://doi.org/10.1177/0143624414566244>
- Chatzidiakou, L., Mumovic, D., & Summerfield, A. J. (2012). What do we know about indoor air quality in school classrooms? A critical review of the literature. *Intelligent Buildings International*, 4(4), 228–259. <https://doi.org/10.1080/17508975.2012.725530>
- Chen, Q. (n.d.). Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications.



- Chen, Y., Tong, Z., & Malkawi, A. (2017). Investigating natural ventilation potentials across the globe: Regional and climatic variations. *Building and Environment*, 122, 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.026>
- Chenari, B., Dias Carrilho, J., & Gameiro da Silva, M. (2016). Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1426–1447. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.074>
- Cheng, J., Qi, D., Katal, A., Wang, L. L., & Stathopoulos, T. (2018). Evaluating wind-driven natural ventilation potential for early building design. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 182(April), 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.09.017>
- CIBSE. (n.d.). AM10-tool. Retrieved from <https://www.cibse.org/Knowledge/Design-Tool-for-IAQ-Analysis>
- CIBSE. (2005). *AM10 Natural Ventilation in non-domestic buildings*. <https://doi.org/10.1002/9781119951773>
- CIBSE. (2013). *TM52. The limits of thermal comfort: avoiding overheating in European buildings*. TM 52 CIBSE. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- CIBSE - Chartered Institution of Building Services Engineers. (n.d.). Retrieved March 22, 2017, from <http://www.cibse.org/>
- CIBSE - Natural Ventilation Group. (n.d.). Retrieved March 22, 2017, from <http://www.cibse.org/networks/groups/natural-ventilation>
- Circulaire du 9 août modifiée relative à la révision du règlement sanitaire départemental type (RSDT). Numéro complémentaire du 13 septembre 1978 (1978). Journal Officiel de la République Française (JORF).
- Clements-Croome, D. J., Awbi, H. B., Bako-Biro, Z., Kochhar, N., & Williams, M. (2008). Ventilation rates in schools. *Building and Environment*, 43(3), 362–367. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.018>
- ClimAct. Transition to a low carbon economy in schools. (2017). Retrieved December 15, 2017, from <http://www.climact.net/>
- Comisión Europea. (2010). Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios. *Boletín Oficial*, L135, 13–35.
- Comisión Europea. (2018). Directiva (UE) 2018/844 por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética. *Diario Oficial de La Unión Europea*, 156, 75–91.
- Congreso, I. V., Energ, E., & Nula, C. (2017). *Libro de comunicación y proyectos - IV Congreso de Edificios Energía Casi Nula. IV Congreso Edificios Energía Casi Nula*.
- Connor, D. O., Calautit, J. K. S., Hughes, B. R., O'connor, D., Calautit, J. K. S., & Hughes, B. R. (2016). A review of heat recovery technology for passive ventilation applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1481–1493. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.039>
- Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Ministerio de Fomento. (n.d.). CTE (Código Técnico de la Edificación). Retrieved from <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-ahorro-energia.html>
- Cook, M., & Short, A. (2017). Natural Ventilation and Low Energy Cooling of Large , Non-Domestic Buildings – Four Case Studies, 3315(March). <https://doi.org/10.1080/14733315.2005.11683923>
- Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J., & Riffat, S. B. (2014). Optimizing insulation thickness and analysing environmental impacts of aerogel-based thermal superinsulation in buildings. *Energy and Buildings*, 77, 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.034>
- CYPE. (n.d.). Retrieved from [http://normativa.cype.es/#certificacion\\_energetica\\_de\\_edificios](http://normativa.cype.es/#certificacion_energetica_de_edificios)
- de Carvalho, P. M., da Silva, M. G., Ramos, J. E., Matos, P., Carvalho, D., Gameiro, M., & Esteves, J. (2013). Influence of weather and indoor climate on clothing of occupants in naturally ventilated school buildings. *Building and Environment*, 59, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.005>
- De Santoli, L., Fraticelli, F., Fornari, F., & Calice, C. (2014). Energy performance assessment and a retrofit strategies in public school buildings in Rome. *Energy and Buildings*, 68, 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.028>
- Dehnavi, M., Ghadiri, M. H., Mohammadi, H., & Ghadiri, H. (2012). Study of Wind Catchers with square plan : Influence of physical parameters, 2(1), 559–564.
- Deng, S., Wang, R. Z., & Dai, Y. J. (2014). How to evaluate performance of net zero energy building - A literature research. *Energy*, 71(2014), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.007>
- Department for Education UK. (2016). *BB 101 Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools*. Department for Education. UK: Department for Education. <https://doi.org/011-2711642>
- Department for Education and skills. (2006). *Building Bulletin 101 Ventilation of School Buildings*. Department for Education and skills. <https://doi.org/011-2711642>
- Department of Energy and Refrigerating Air- Conditioning Engineering, National Taipei University of Technology, 1, Sec. 3, Chung-Hsiao E. Rd., Taipei 106, T. (2011). Myth of ecological architecture designs: Comparison between design concept and computational analysis results of natural-ventilation for Tjibaou Cultural Center in New Caledonia. *Energy & Buildings*, 43(10), 2788–2797. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.035>
- Desideri, U., Arcioni, L., Leonardi, D., Cesaretti, L., Perugini, P., Agabiti, E., & Evangelisti, N. (2014). Design of a



- multipurpose “ zero energy consumption ” building according to European Directive 2010 / 31 / EU : Life cycle assessment. *Energy & Buildings*, 80, 585–597. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.027>
- DesignBuilder Software Ltd - Home. (n.d.). Retrieved April 16, 2017, from <https://www.designbuilder.co.uk/>
- Dias, L., Neto, L., Bernardo, H., & Gameiro, M. (2017). An integrated approach on energy consumption and indoor environmental quality performance in six Portuguese secondary schools. *Energy Research & Social Science*, 32, 23–43. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.02.004>
- Dias Pereira, L., Raimondo, D., Corngati, S. P., & Gameiro Da Silva, M. (2014). Energy consumption in schools - A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 911–922. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.010>
- Division, I. D. of E. and E. C., & Development. (2011). *Building Quality Standards Handbook*.
- DOCE Diario Oficial de la Unión Europea. (2012). Directiva 2012/27/UE del parlamento Europeo y del Consejo relativa a la eficiencia energética. *Diario Oficial de La Unión Europea*, 1–56.
- Document, G. (2009). *T e c h n i c a l Guidance Document*.
- Dra. Niki Gaitani. (2014). Nearly Zero Energy Buildings ( nZEB ) Status Report in Mediterranean countries, (June).
- Driss, S., Driss, Z., Kammoun, I. K., & Kallel Kammoun, I. (2015). Numerical simulation and wind tunnel experiments on wind-induced natural ventilation in isolated building with patio. *Energy*, 90, 917–925. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.128>
- E.Yarke, M.Fujol, L.Vitali, M. S. (2004). VENTILACION NATURAL - ESTIMACION DE PARAMETROS SOBRE MODELOS A ESCALA UTILIZANDO EQUIPAMIENTO DE BAJO COSTO. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 8(2), 1–6. <https://doi.org/ISSN 0329-5184>
- ECA Urban air indoor environment and human exposure. (2003). *Report nº 23. Ventilation, Good Indoor Air Quality and Rational Use of Energy. Report nº 23 “Urban Air, Indoor Environment and human exposure.”* <https://doi.org/ISBN 92-894-5664-7>
- Edurado, K. (n.d.). SINPHONIE. Schools Indoor Pollution and Health: Observatory Network in Europe. Retrieved from <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC87071>
- Elmualim, A. A., & Awbi, H. B. (2016). Wind Tunnel and CFD Investigation of the Performance of “ Windcatcher ” Ventilation Systems. *International Journal of Ventilation*, 1(1). <https://doi.org/10.1080/14733315.2002.11683622>
- Energy in Buildings and Communities Programme, E. (2018). *International Energy Agency. Ventilative Cooling Design Guide. March 2018*.
- EnergyPlus | EnergyPlus. (n.d.). Retrieved April 16, 2017, from <https://energyplus.net/>
- EPA. (2017). *Reducing Urban Heat islands* (Vol. 2016-Novem). <https://doi.org/10.1109/IICPE.2016.8079546>
- Erhorn-kluttig, H., & Erhorn, H. (2014). School of the Future – Towards zero emission with high performance indoor environment. *Energy Procedia*, 48, 1468–1473. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.166>
- Etheridge, D. (2012). *Natural ventilation of buildings: theory, measurement and design*. Chichester: Wiley.
- Etheridge, D. (2014). A perspective on fifty years of natural ventilation research. *Building and Environment*, 91, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.033>
- European Commission. Directorate for Health and Consumers. (2014). *Schools Indoor Pollution & Health Observatory Network in Europe*. <https://doi.org/10.2788/95941>
- European Parliament. Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings, Official Journal Of The European Union § (2002). <https://doi.org/10.1039/ap9842100196>
- European Parliament. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), Official Journal of the European Union § (2010). [https://doi.org/doi:10.3000/17252555.L\\_2010.153.eng](https://doi.org/doi:10.3000/17252555.L_2010.153.eng)
- European Parliament. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, Official Journal of the European Union Directive § (2012). [https://doi.org/10.3000/19770677.L\\_2012.315.eng](https://doi.org/10.3000/19770677.L_2012.315.eng)
- Europeo, E. L. P., Consejo, E. L., & Uni, D. E. L. a. DIRECTIVA 2002/91/CE relativa a la eficiencia energética de los edificios (DEEE), 2002 Directiva § (2003).
- Executive, S. (2007). *SCHOOL DESIGN: OPTIMISING THE INTERNAL ENVIRONMENT. building our future: scotlands’s school estate*.
- Faggianelli, G. A., Brun, A., Wurtz, E., & Muselli, M. (2014). Natural cross ventilation in buildings on Mediterranean coastal zones. *Energy and Buildings*, 77, 206–218. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.042>
- Flourentzou, F., & Pantet, S. (2014). THEORETICAL AND REAL VENTILATION HEAT LOSSES AND ENERGY PERFORMANCE IN LOW ENERGY BUILDINGS, (Mopec).
- Flourentzou, F., Pantet, S., & Ritz, K. (2016). Design and performance of controlled natural ventilation in school gymnasiums. *International Journal of Ventilation*. <https://doi.org/10.1080/14733315.2016.1220202>
- Flourentzou, F., Pantet, S., & Ritz, K. (2017). Design and performance of controlled natural ventilation in school

- gymnasiums. *International Journal of Ventilation*, 0(0), 1–12. <https://doi.org/10.1080/14733315.2016.1220202>
- Fluent- Ansys. (n.d.). Retrieved from <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- Fordham, M. (2000). Natural ventilation. *Renewable Energy*, 19, 17–37.
- Foruzanmehr, A., & Vellinga, M. (2011). Vernacular architecture: questions of comfort and practicability. *Building Research & Information*, 39(3), 274–285. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.562368>
- Fuentes Freixanet, V., & Rodríguez Viqueira, M. (n.d.). *VENTILACIÓN NATURAL*.
- Gao, J., Wargocki, P., & Wang, Y. (2014). Ventilation system type, classroom environmental quality and pupils' perceptions and symptoms. *Building and Environment*, 75, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.015>
- Gennaro, G. De, Rosario, P., Annamaria, D., Loiotile, D., de Gennaro, G., Dambruoso, P. R., ... Porcelli, F. (2014). Indoor air quality in schools. *Environmental Chemistry Letters*, 12(4), 467–482. <https://doi.org/10.1007/s10311-014-0470-6>
- Germano, M., Ghiaus, C., & Roulet, C.-A. (2004). *URBVENT Natural ventilation in urban areas - Potential assessment and optimal façade design Workpackage 1 SOFT COMPUTING OF NATURAL VENTILATION POTENTIAL. Natural Ventilation in the Urban Environment: Assessment and Design* (Vol. 9781849772). <https://doi.org/10.4324/9781849772068>
- Ghaemmaghami, P. S., & Mahmoudi, M. (2005). Wind tower a natural cooling system in Iranian traditional architecture. In *International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment"* (pp. 71–76).
- Ghiaus, C., Allard, F., Santamouris, M., & Georgakis, C. (2003). *URBVENT WP2 final report: optimal openings design*.
- Gil-Baez, M., Barrios-Padura, Á., Molina-Huelva, M., & Chacartegui, R. (2017). Natural ventilation systems in 21st-century for near zero energy school buildings. *Energy*, 137, 1186–1200. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.188>
- Gil-Baez, M., Barrios-Padura, Á., Molina-Huelva, M., & Chacartegui, R. (2017). Natural ventilation systems to enhance sustainability in buildings: a review towards zero energy buildings in schools. *E3S Web of Conferences*, 22, 00053. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172200053>
- Gil-Báez, M., Barrios-Padura, Á., Molina-Huelva, M., & Roldán-Vendrell, C. (2017). Natural ventilation systems in Mediterranean schools. A prototype experience in Andalusia as an alternative to mechanical ventilation. In *38th AIVC Conference "Ventilating healthy low-energy buildings", Nottingham, UK, 13-14 September 2017* (p. 12).
- Gil-Baez, M., Padura, Á., & Huelva, M.. (2019). Passive actions in the building envelope to enhance sustainability of schools in a Mediterranean climate. *Energy*, 167, 144–158. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.094>
- Givoni, B. (1969). *Man, climate and architecture*. Amsterdam [etc.]: Elsevier Publishing Company Limited.
- Gładyszewska-Fiedoruk, K., & Gajewski, A. (2012). Effect of wind on stack ventilation performance. *Energy and Buildings*, 51, 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.05.007>
- González Sandino, R., & López de Asiáin, J. (1994). *Análisis bioclimático de la arquitectura*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- Grupo TEP 130. (n.d.). Estudio comparativo de sistemas de calefacción y climatización en los proyectos de centros docentes en Andalucía, fase I y fase II. Retrieved from <https://grupo.us.es/grupotep130/es/component/content/article/136-contratos/con-10anos/498-estudio-comparativo-de-sistemas-de-calefaccion-y-climatizacion-en-los-proyectos-de-centros-docentes-en-andalucia-fase-i-y-fase-ii>
- Guidelines for Indoor Hygiene in School Buildings*. (2008).
- Guillén-Lambea, S., Rodríguez-Soria, B., & Marín, J. M. (2016). Review of European ventilation strategies to meet the cooling and heating demands of nearly zero energy buildings (nZEB)/Passivhaus. Comparison with the USA. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 561–574. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.021>
- Haldi, F. F., Robinson, D., & Haldi, F. F. (2011). The impact of occupants' behaviour on building energy demand. *Journal of Building Performance Simulation*, 4, 323–338. <https://doi.org/10.1080/19401493.2011.558213>
- Heating, F. of E., & Associations, V. and A. C. (n.d.). REHVA. Retrieved from <https://www.rehva.eu/>
- Heiselberg, P. (2017). Natural Ventilation Design, 3315(March). <https://doi.org/10.1080/14733315.2004.11683674>
- Heiselberg, P., Bjørn, E., & Nielsen, P. V. (2017). Impact of Open Windows on Room Air Flow and Thermal Comfort Impact of Open Windows on Room Air Flow and Thermal Comfort, 3315(March), 90–100. <https://doi.org/10.1080/14733315.2002.11683625>
- Hellwig, R., Sedlmeier, M., & Tanzer, C. (2017). Prospects of Improving the Indoor Air Quality in Classrooms by Reactivating Historic Ventilation Stacks, 3315(March). <https://doi.org/10.1080/14733315.2015.11684076>
- Heudorf U. (2007). [Passive-house schools—a tool for improving indoor air quality in schools?]. *Gesundheitswesen*, 69(7), 408–414.
- Hiyama, K., & Glicksman, L. (2015). Preliminary design method for naturally ventilated buildings using target air

- change rate and natural ventilation potential maps in the United States. *Energy*, 89, 655–666. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.026>
- Homod, R. Z., Salleh, K., Sahari, M., Almurib, H. A. F., Sahari, K. S. M., & Almurib, H. A. F. (2014). Energy saving by integrated control of natural ventilation and HVAC systems using model guide for comparison. *Renewable Energy*, 71, 639–650. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.06.015>
- Hong, T., Taylor-lange, S. C., Oca, S. D., Yan, D., & Corngati, S. P. (2016). Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings &. *Energy & Buildings*, 116, 694–702. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.052>
- Hooff, T. Van, Blocken, B., Timmermans, H. J. P., Hensen, J. L. M., van Hooff, T., Blocken, B., ... Hensen, J. L. M. (2016). Analysis of the predicted effect of passive climate adaptation measures on energy demand for cooling and heating in a residential building. *Energy*, 94, 811–820. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.036>
- Hughes, B. R., & Abdul Ghani, S. A. (2009). A numerical investigation into the effect of windvent dampers on operating conditions. *Building and Environment*, 44, 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.02.012>
- Hughes, B. R., & Ghani, S. A. A. A. (2010). A numerical investigation into the effect of Windvent louvre external angle on passive stack ventilation performance. *Building and Environment*, 45, 1025–1036. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.10.010>
- HULC. (n.d.). Retrieved from <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-recursos/menu-aplicaciones/282-herramienta-unificada-lider-calener>
- IEA-EBC. (n.d.). International Energy Agency-Energy in buildings and Communities Programm. Retrieved from <http://www.iea-ebc.org/>
- IEA (International Energy Agency). (n.d.). Retrieved from <https://www.iea.org/>
- Indoor Air Quality Association. (n.d.). Retrieved March 22, 2017, from <http://www.iaqa.org/>
- Inive / International Network for Information on Ventilation and Energy Performance. (n.d.). Retrieved from <http://www.inive.org>
- International Energy Agency's Energy in Buildings and Communities. (n.d.). International Energy Agency's Energy in Buildings and Communities Programme.
- International Energy Agency's Energy in Buildings and Communities, & IEA-EBC. (n.d.). International Energy Agency-Energy in buildings and Communities Programm. Retrieved March 22, 2017, from <http://iea-ebc.org/>
- International Energy Agency. (2013). *Transition to Sustainable Buildings*. OECD (Vol. 9789264202). OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264202955-en>
- Italian Ministry for the Environment, L. and S. (2010). *School Environment and Respiratory Health of Children (SEARCH) International research project report within the programme "Indoor air quality in European schools: Preventing and reducing respiratory diseases."*
- J. M. Daisey, W. J. Angell, M. G. A. (2003). Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. *Transactions of the American Mathematical Society*, 13, 53–64. <https://doi.org/10.1007/s10115-011-0460-y>
- J. Rosbach E. Krop, M. Vonk, J. van Ginkel, C. Meliefste, S. de Wind, U. Gehring, B. B. (2016). Classroom ventilation and indoor air quality — results from the FRESH intervention study. *Indoor Air*, 26, 538–545. <https://doi.org/10.1111/ina.12231>
- J. Yu, Q. Ouyang, Y. Zhu, H. Shen, G. Cao, W. C., Yu, J., Ouyang, Q., Zhu, Y., Shen, H., Cao, G., & Cui, W. (2012). A comparison of the thermal adaptability of people accustomed to air-conditioned environments and naturally ventilated environments. *Indoor Air*, 22(September 2011), 110–118. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00746.x>
- Jaboyedoff, P., Roulet, C., Dorer, V., Weber, A., & Pfeiffer, A. (2004). Energy in air-handling units - results of the AIRLESS European Project Energy in air-handling units — results of the AIRLESS European Project, (April). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.047>
- Jaime Lopez de Asiaín, Rafael González Sandino, José María Cabeza Láinez, Margarita de Luxán García de Diego, Flavio Celis D'Amico, Fernando da Casa Martín, Ernesto Echevarría Valiente, I. de V. R. (1997). *Arquitectura y Clima en Andalucía: Manual de Diseño*. (Junta de Andalucía. Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Ed.).
- Jefatura del Estado. (2012). Ley 38 1999, de Ordenación de la Edificación. *Boletín Oficial Del Estado (BOE)*, 1855, 1–24. <https://doi.org/Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico>
- Jiang, Y., Alexander, D., Jenkins, H., Arthur, R., & Chen, Q. (n.d.). Natural Ventilation in Buildings: Measurement in a Wind Tunnel and Numerical Simulation with Large Eddy Simulation.
- Jiang, Y., & Chen, Q. (n.d.). Study of natural ventilation in buildings by large eddy simulation.
- Jones, B. M., & Kirby, R. (2009a). Quantifying the performance of a top-down natural ventilation Windcatcher. *Building and Environment*, 44(9), 1925–1934. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.004>
- Jones, B. M., & Kirby, R. (2009). Quantifying the performance of a top – down natural ventilation Windcatcher Ô. *Building and Environment*, 44(9), 1925–1934. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.004>

- Jones, B. M., Kirby, R., Jones, B. M., & Kirby, R. (2016). The Performance of Natural Ventilation Windcatchers in Schools -A Comparison between Prediction and Measurement The Performance of Natural Ventilation Windcatchers in Schools - A Comparison between Prediction and Measurement. *International Journal of Ventilation*, 9(3). <https://doi.org/10.1080/14733315.2010.11683886>
- Jovanovi, M., Vu, B., Turanjanin, V., & Zivkovi, M. (2014). Investigation of indoor and outdoor air quality of the classrooms at a school in Serbia. *Energy*, 77(April), 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.080>
- Jovanović, M., Vučićević, B., Turanjanin, V., Živković, M., & Spasojević, V. (2014). Investigation of indoor and outdoor air quality of the classrooms at a school in Serbia. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.080>
- Junta de Andalucía, C. de E. (n.d.). ISE-APAE. Consejería de Educación (Junta de Andalucía). Retrieved from <http://www.iseandalucia.es/web/guest?jsessionid=AA27AEE4573AD33E4D3E89ABF6BE32D9>
- Kalimeri, K. K., Saraga, D. E., Lazaridis, V. D., Legkas, N. A., Missia, D. A., Tolis, E. I., & Bartzis, J. G. (2016). Indoor air quality investigation of the school environment and estimated health risks : Two-season measurements in primary schools in Kozani , Greece. *Atmospheric Pollution Research*, 7(6), 1128–1142. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.07.002>
- Khan, N., Su, Y., Hopper, N., & Riffat, S. (2017). Evaluation of Natural Ventilation and Cooling Systems using Dynamic Simulation Methods, 3315(March). <https://doi.org/10.1080/14733315.2011.11683942>
- Khan, N., Su, Y., & Riffat, S. B. (2008). A review on wind driven ventilation techniques. *Energy and Buildings*, 40(8), 1586–1604. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.015>
- Khatami, N., Cook, M. J., Firth, S. K., & Hudleston, N. (2017). Control of Carbon Dioxide Concentration in Educational Spaces Using Natural Ventilation, 3315(March). <https://doi.org/10.1080/14733315.2013.11683992>
- Kingspan. (n.d.). Retrieved from <https://www.kingspan.com/group/>
- Kolokotroni, M., Ge, Y. T., & Katsoulas, D. (2002). Monitoring and modelling indoor air quality and ventilation in classrooms within a purpose-designed naturally ventilated school. *Indoor and Built Environment*, 11(6). <https://doi.org/10.1159/000068232>
- Kolokotroni, M., Perera, M. D. A. E. S., Azzi, D., & Virk, G. S. (2001). An investigation of passive ventilation cooling and control strategies for an educational building. *Applied Thermal Engineering*, 21(2). [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(00\)00008-9](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(00)00008-9)
- Kolokotroni, M., Webb, B. C., & Hayes, S. D. (1998). Summer cooling with night ventilation for office buildings in moderate climates. *Energy and Buildings*, 27(3). [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00048-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00048-0)
- Kolokotroni, M., & Young, A. N. (1990). Guidelines for bioclimatic housing design in Greece. *Building and Environment*, 25(4), 297–307. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(90\)90003-A](https://doi.org/10.1016/0360-1323(90)90003-A)
- Kotani, H., Goto, T., Ohba, M., & Kurabuchi, T. (2017). Review of Cross-Ventilation Research Papers - from the Working Group for Natural Ventilation and Cross-Ventilation of the Architectural Institute of Japan, 3315(March). <https://doi.org/10.1080/14733315.2009.11683848>
- Krawczyk, D. A. (2014). Theoretical and real effect of the school's thermal modernization - A case study. *Energy and Buildings*, 81, 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.058>
- Kurnitski, J., Kolokotroni, M., Farrou, I., & Warren, P. (2009). Advanced ventilation technologies for good indoor climate and energy performance demonstrated in Building AdVent project. In *9th International Conference and Exhibition - Healthy Buildings 2009, HB 2009*.
- Lee, S. H., Hong, T., Piette, M. A., & Taylor-lange, S. C. (2015). Energy retrofit analysis toolkits for commercial buildings: A review. *Energy*, 89, 1087–1100. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.112>
- Li, D. H. W., Pan, W., & Lam, J. C. (2014). A comparison of global bioclimates in the 20th and 21st centuries and building energy consumption implications. *Building and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.02.009>
- Li, L., & Mak, C. M. (2007). The assessment of the performance of a windcatcher system using computational fluid dynamics. *Building and Environment*, 42, 1135–1141. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.12.015>
- Li, Y., & Heiselberg, P. (2017). Analysis Methods for Natural and Hybrid Ventilation - a Critical Literature Review and Recent Developments, 3315(March). <https://doi.org/10.1080/14733315.2003.11683640>
- Linden, P. F. (1999). The fluid mechanics of Natural Ventilation. *Annual Review Fluid Mechanics*, 31, 201–238.
- Lizana, Jesús, Chacartegui, R., Barrios-padura, A., & Manuel, J. (2017). Advances in thermal energy storage materials and their applications towards zero energy buildings: A critical review, 203, 219–239. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.008>
- Lizana, Jesus, Serrano-Jimenez, A., Ortiz, C., Becerra, J. A., & Chacartegui, R. (2018). Energy assessment method towards low-carbon energy schools. *Energy*, 159, 310–326. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.147>
- López de Asíaín, J. (1980). *Arquitectura, energía y medio ambiente*. Sevilla : Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Seminario de Arquitectura Bioclimática.
- Luiz, M., Pereira, M., Vilain, R., Tribess, A., & Morawska, L. (2015). RISK ASSESSMENT FOR AIRBORNE INFECTIOUS DISEASES BETWEEN NATURAL VENTILATION AND A SPLIT-SYSTEM AIR CONDITIONER



- IN A UNIVERSITY CLASSROOM, 1–5. <https://doi.org/10.20906/CPS/COB-2015-0358>
- Madureira, J., Paciencia, I., Pereira, C., Teixeira, J., & Fernandes, E. de O. (2016). Indoor air quality in Portuguese schools : levels and sources of pollutants. *Indoor Air*, 26, 526–537. <https://doi.org/10.1111/ina.12237>
- Mardiana-idayu, A., & Riffat, S. B. (2012). Review on heat recovery technologies for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1241–1255. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.026>
- Masoumi, H. R., & Nasim Nejati, and A. alah A. (2016). Learning from the Heritage Architecture: Developing Natural Ventilation in Compact Urban Form in Hot-Humid Climate: Case Study of Bushehr, Iran. *International Journal of Architectural Heritage*, 00(00), 1–18. <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1238971>
- Mathur, R. (1994). A Study of Solar Chimney Assisted Wind Tower System for Natural Ventilation in Buildings.
- Medved, S., Babnik, M., Vidrih, B., & Arkar, C. (2014). Parametric study on the advantages of weather-predicted control algorithm of free cooling ventilation system. *Energy*, 73, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.080>
- Ministerio de Economía y Hacienda, Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, & Ministerio de Economía y Hacienda. Real Decreto 1751/1998, de 31 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) y sus Instrucciones Técnicas Complementarias (ITE) y se crea la Comisión Asesora para las Instalaciones Térmicas de los Edificios, Boe § (1998).
- Ministerio de Fomento. (n.d.). CTE.
- Ministerio de Fomento. DBHS. Documento básico salubridad, 2018 Septiembre § (2017).
- Ministerio de la Presidencia. Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, Real Decreto § (2007). España.
- Ministerio de la Presidencia, & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España. Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, Real Decreto § (2013). España.
- Ministerio de vivienda. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación, Boletín oficial del estado § (2006).
- Ministerio para la Transición Ecológica. (n.d.). Retrieved from <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/legislacion/documentacion/estrategia-espanola-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/default.aspx>
- Mishra, A. K., & Ramgopal, M. (2015). A comparison of student performance between conditioned and naturally ventilated classrooms. *Building and Environment*, 84, 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.008>
- MIT. (n.d.). Cool Vent. Retrieved from <http://coolvent.mit.edu/>
- Mochida, A., Yoshino, H., & Takeda, T. (2005). Methods for controlling airflow in and around a building under cross-ventilation to improve indoor thermal comfort, 93, 437–449. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2005.02.003>
- Monodraught: Engineering delivered. Naturally. (n.d.). Retrieved March 22, 2017, from <http://www.monodraught.com/>
- Montazeri, H., & Azizian, R. (2008). Experimental study on natural ventilation performance of one-sided wind catcher, (January), 1–16.
- Moriske, H.-J., & Szwedzyk, R. (n.d.). Guidelines for indoor air hygiene in schools.
- Naciones Unidas. (n.d.). Retrieved from <http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/agreed.htm>
- Naturalcooling- Optivent. (n.d.). Retrieved from <http://naturalcooling.co.uk/>
- Neila González, F. J. (2004). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. Madrid : Munilla-Lería, .
- Neila González, F. J., & Acha Román, C. (2009). *Arquitectura bioclimática y construcción sostenible*. Pamplona : DAPP Publicaciones Jurídicas .
- Nicol, F, & Pagliano, L. (2007). Allowing for thermal comfort in free-running buildings in the new European Standard EN15251. In *2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, September 2007, Crete island, Greece*.
- Nicol, Fergus. (2017). Temperature and adaptive comfort in heated , cooled and free-running dwellings, 3218. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1283922>
- Nicol, Fergus, & Humphreys, M. (2016). Thermal comfort as part of a self-regulating system, (May 1973). <https://doi.org/10.1080/09613217308550237>
- Nicol, J F, & Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings, 34, 563–572.
- Nicol, J Fergus, & Roaf, S. (2017). Rethinking thermal comfort. *Building Research & Information*, 45(7), 711–716. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1301698>
- NIST. (n.d.-a). CONTAM. Retrieved from <https://www.nist.gov/services-resources/software/contam>
- NIST. (n.d.-b). LoopDa. Retrieved from <https://www.nist.gov/el/energy-and-environment-division-73200/nist-multizone-modeling/software-tools/loopda>
- Nitatwichit, C., Khunatorn, Y., & Tippayawong, N. (2008). Investigation and characterization of cross ventilating flows through openings in a school classroom. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 31(4), 587–603. <https://doi.org/10.1080/02533839.2008.9671413>
- Nomura, M., & Hiyama, K. (2017). A review: Natural ventilation performance of office buildings in Japan. *Renewable*

- and Sustainable Energy Reviews, 74(January), 746–754. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.083>
- NZEB renovation for Mediterranean schools. (n.d.).
- Objetivos desarrollo sostenible ONU. (n.d.).
- Ohba, M., & Lun, I. (2010). Overview of natural cross-ventilation studies and the latest simulation design tools used in building ventilation-related research. *Advances in Building Energy Research*, 4(1), 127–166. <https://doi.org/10.3763/aber.2009.0405>
- Ole Fanger, P. (2001). Human requirements in future air-conditioned environments. *International Journal of Refrigeration*. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(00\)00011-6](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(00)00011-6)
- Ole Fanger, P., & Toftum, J. (2002). Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. *Energy and Buildings*, 34(6), 533–536. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00003-8)
- Olgay, V., Frontado, J., & Clavet, L. (1998). *Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas* (1a ed., 3a). Barcelona [etc.] : Gustavo Gili.
- Omrani, S., Garcia-hansen, V., Capra, B. R., & Drogemuller, R. (2017). Effect of natural ventilation mode on thermal comfort and ventilation performance : Full-scale measurement. *Energy & Buildings*, 156, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.061>
- Oropeza-perez, I., Alberg, P., & Østergaard, P. A. (2014). The influence of an estimated energy saving due to natural ventilation on the Mexican energy system. *Energy*, 64, 1080–1091. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.009>
- Oropeza-Perez, I., & Østergaard, P. A. (2014). Energy saving potential of utilizing natural ventilation under warm conditions - A case study of Mexico. *Applied Energy*, 130, 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.035>
- Oropeza-Perez, I., & Østergaard, P. A. (2014). Potential of natural ventilation in temperate countries-A case study of Denmark. *Applied Energy*, 114, 520–530. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.008>
- P Ole Fanger. (2001). Human requirements in future air-conditioned environments. *International Journal of Refrigeration*, 24, 148–153.
- Passe, U., & Battaglia, F. (2015). *Designing spaces for natural ventilation: an architect's guide*. New York, NY : Routledge.
- Passive House Institute. (n.d.).
- Passivent. (n.d.). Retrieved from <http://www.passivent.com/>
- Pegas, P. N., Alves, C. A., Evtugina, M. G., Nunes, T., Cerqueira, M., Franchi, M., ... Freitas, M. C. (2011). Indoor air quality in elementary schools of Lisbon in spring, 455–468. <https://doi.org/10.1007/s10653-010-9345-3>
- Pegg, I., Cripps, A., & Kolokotroni, M. (2005). A post-occupancy evaluation of a low energy school (City Academy) in the UK. *International Journal of Ventilation*, 4(3).
- Pegg, I. M., Cripps, A., & Kolokotroni, M. (2007). Post-occupancy performance of five low-energy schools in the UK. In *ASHRAE Transactions* (Vol. 113 PART 2).
- Pereira, M. D. (2016). *Modernised Portuguese Schools - From IAQ and Thermal Comfort towards Energy Efficiency Plans*.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Pérez Rendón, C. A. (n.d.). *De profundis: herramientas de simulación del potencial eenergético de la tierra en arquitectura*.
- Persily, A. (2015). Challenges in developing ventilation and indoor air quality standards: The story of ASHRAE Standard 62. *Building and Environment*, 91, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.026>
- Physics, F. I. for B. (n.d.). Fraunhofer IBP. Retrieved from <https://www.pruefstellen.ibp.fraunhofer.de/en.html>
- Quality, D., & Spaces, L. (n.d.). Designing Quality Learning Spaces : Ventilation & Indoor Air Quality.
- Ramvalho, O., Wyart, G., Mandin, C., Blondeau, P., Cabanes, P. A., Leclerc, N., ... Redaelli, M. (2015). Association of carbon dioxide with indoor air pollutants and exceedance of health guideline values. *Building and Environment*, 93(P1), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.018>
- Rana, R., Kusy, B., Wall, J., & Hu, W. (2015). Novel activity classification and occupancy estimation methods for intelligent HVAC (heating , ventilation and air conditioning) systems. *Energy*, 93, 245–255. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.002>
- Redlich, C. A., Sparer, J., & Cullen, M. R. (1997). Sick-building syndrome. *The Lancet*, 349, 1013–1016.
- Renew School. (n.d.). Retrieved from <http://www.renew-school.eu/en/home/>
- RENEW SCHOOL | Quick – affordable – green and healthy. (n.d.). Retrieved May 2, 2016, from <http://www.renew-school.eu/en/home/>
- Richard, B., Kaiser, J., Abdul, S., Hughes, B. R., Calautit, J. K., & Ghani, S. A. (2012). The development of commercial wind towers for natural ventilation: A review. *Applied Energy*, 92, 606–627. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.066>
- Rivas, I., Viana, M., Moreno, T., Pandol, M., Amato, F., Reche, C., & Bouso, L. (2014). Child exposure to indoor and



- outdoor air pollutants in schools in Barcelona , Spain, 69, 200–212.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.04.009>
- Roders, M., & Straub, A. (2015). Assessment of the likelihood of implementation strategies for climate change adaptation measures in Dutch social housing. *Building and Environment*, 83, 168–176.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.07.014>
- Romana, F., Ianniello, E., & Igor, B. (2013). PMV e PPD and acceptability in naturally ventilated schools. *Building and Environment*, 67, 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.05.013>
- Rosbach, J. T. M., Vonk, M., Duijm, F., Ginkel, J. T. Van, Gehring, U., Brunekreef, B., ... Brunekreef, B. (2013). A ventilation intervention study in classrooms to improve indoor air quality : the FRESH study. *Environ Health*, 12, 1–10. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-110>
- Rufo, J. C., Madureira, J., Paciência, I., Aguiar, L., Teixeira, J. P., Moreira, A., ... Fernandes, E. D. O. (2016). Indoor air quality and atopic sensitization in primary schools: A follow-up study. *Porto Biomedical Journal*, 1(4), 142–146. <https://doi.org/10.1016/j.pbj.2016.07.003>
- RV Burke. (n.d.). Programa VISOL. Retrieved from <http://www.rvburke.com/visorlider.html>
- Saadatian, O., Haw, L. C., Sopian, K., & Sulaiman, M. Y. (2012). Review of windcatcher technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1477–1495. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.037>
- Sacht, H., & Azoia, M. (2017). Windows Size and the Performance of Natural Ventilation. *Procedia Engineering*, 196(June), 972–979. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.038>
- Sadat, Z., Tahsildoost, M., & Hafezi, M. (2016). Thermal comfort in educational buildings : A review article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 895–906. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.033>
- Salthammer, T., Uhde, E., Schripp, T., Schieweck, A., Morawska, L., Mazaheri, M., ... Kumar, P. Children's well-being at schools: Impact of climatic conditions and air pollution, 94 *Environment International* § (2016). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.05.009>
- Sanchez, J., Salmerón, J. M., Sanchez, F. J., Alvarez, S., Molina, J. L., Sevilla, U. De, & España, S. (2012). Ventilación natural : estudio aerodinámico mediante CFD de extractores pasivos y captadores de viento  
 Natural ventilation : CFD aerodynamic study about passive extractor and windcatcher, 27, 40–56.
- Santamouris, M. (2007). *Advances in passive cooling*. London : Earthscan.
- Santamouris, M. (Matheos), & Wouters, P. (2006). *Building ventilation: the state of the art*. London : Earthscan.
- Santamouris, M., Pavlou, C., Doukas, P., & Mihalakakou, G. (2007). Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens , Greece, 32, 1781–1788. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.11.011>
- Sassi, P. (2013). A Natural Ventilation Alternative to the Passivhaus Standard for a Mild Maritime Climate. *Buildings*, 3(1), 61–78. <https://doi.org/10.3390/buildings3010061>
- School of the future. (n.d.). Retrieved March 23, 2017, from <http://www.school-of-the-future.eu/>
- Schulze, T., & Eicker, U. (2013). Controlled natural ventilation for energy efficient buildings. *Energy & Buildings*, 56, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.044>
- Severo, M., Ramos, E., Madureira, J., Barros, H., & Fernandes, E. D. O. (2016). Source apportionment of CO<sub>2</sub> , PM<sub>10</sub> and VOCs levels and health risk assessment in naturally ventilated primary schools in Porto, Portugal. *Building and Environment*, 96, 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.031>
- Skov, P. (1987). THE “SICK” BUILDING SYNDROME IN THE OFFICE ENVIRONMENT: THE DANISH TOWN HALL STUDY. *Environment International*, 13, 339–349.
- Soebarto, V., & Bennetts, H. (2014). Thermal comfort and occupant responses during summer in a low to middle income housing development in South Australia. *Building and Environment*, 75, 19–29.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.013>
- Song, J., & Meng, X. The Improvement of Ventilation Design in School Buildings Using CFD Simulation, 121 *Procedia Engineering* § (2015). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.073>
- Stabile, L., Dell, M., Frattolillo, A., Massimo, A., & Russi, A. (2016). Effect of natural ventilation and manual airing on indoor air quality in naturally ventilated Italian classrooms. *Building and Environment*, 98, 180–189.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.009>
- Stafford, T. M. (2015). Indoor air quality and academic performance. *Journal of Environmental Economics and Management*, 70, 34–50. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2014.11.002>
- Stazi, F., Naspi, F., Ulpiani, G., & Di, C. (2017). Indoor air quality and thermal comfort optimization in classrooms developing an automatic system for windows opening and closing. *Energy & Buildings*, 139, 732–746.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.017>
- Steve Irving, Brian Ford, D. E., & (CIBSE). (2005). *AM10 Natural Ventilation in non domestic buildings*.
- Su, Y., Riffat, S. B., Lin, Y. L., & Khan, N. (2008a). Experimental and CFD study of ventilation flow rate of a Monodraught TM windcatcher. *Energy and Buildings*, 40, 1110–1116.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.10.001>
- Su, Y., Riffat, S. B., Lin, Y. L., & Khan, N. (2008b). Experimental and CFD study of ventilation flow rate of a

- Monodraught™ windcatcher. *Energy and Buildings*, 40, 1110–1116.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.10.001>
- Subhi, O., Galal, K., & Alkass, S. (2014). Integrated LCA-LEED sustainability assessment model for structure and envelope systems of school buildings. *Building and Environment*, 80, 61–70.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.021>
- Tan, G., & Glicksman, L. R. (2005). Application of integrating multi-zone model with CFD simulation to natural ventilation prediction, 37, 1049–1057. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.12.009>
- Technical University of Denmark. (n.d.). HealthVent. Retrieved from <http://www.healthvent.byg.dtu.dk/>
- Teenergy Schools | High energy efficiency schools in Mediterranean Area. (n.d.). Retrieved May 2, 2016, from <http://teenergy.commpla.com/>
- The Earth Charter. (n.d.). Retrieved from <http://earthcharter.org/discover/the-earth-charter/>
- Thunshelle, K., & Hauge, Å. L. (2015). User evaluation of the indoor climate of the first passive house school in Norway. *Energy Efficiency*, 965–980. <https://doi.org/10.1007/s12053-015-9399-2>
- TightVent Europe. Building and ductwork airtightness platform. (n.d.). Retrieved March 22, 2017, from <http://tightvent.eu/>
- Toe, D. H. C., Kubota, T., Hooi, D., Toe, C., & Kubota, T. (2013). Development of an adaptive thermal comfort equation for naturally ventilated buildings in hot-humid climates using ASHRAE RP-884 database. *Frontiers of Architectural Research*, 2, 278–291. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2013.06.003>
- Toftum, J., Kjeldsen, B. U., Wargocki, P., Menå, H. R., Hansen, E. M. N., & Clausen, G. (2015). Association between classroom ventilation mode and learning outcome in Danish schools. *Building and Environment*, 92, 494–503. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.017>
- Trebilcock, M., Soto-Muñoz, J., Yañez, M., & Figueroa-San Martín, R. (2017). The right to comfort: A field study on adaptive thermal comfort in free-running primary schools in Chile. *Building and Environment*, 114, 455–469. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.036>
- Turanjanin, V., Vucicevic, B., Jovanovic, M., Mirkov, N., & Lazovic, I. (2014). Indoor CO2 measurements in Serbian schools and ventilation rate calculation. *Energy*, 77, 290–296. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.028>
- Turunen, M., Toyinbo, O., Putus, T., Nevalainen, A., Shaughnessy, R., & Haverinen-shaughnessy, U. (2014). Indoor environmental quality in school buildings, and the health and wellbeing of students. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 217(7), 733–739. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2014.03.002>
- Tymkow, P., Tassou, S., Kolokotroni, M., & Jouhara, H. (2013). *Building services design for energy efficient buildings*. (T. and Francis, Ed.). <https://doi.org/https://doi.org/10.4324/9780203840733>
- UNIVERSITE DE LA ROCHELLE, F., (CSTC/WTGB), B. B. R. I., Belgium, LTD, B. R. E., Kingdom, U., (CNRS), C. N. de la R. S., ... LAUSANNE, S. F. I. O. T. (n.d.). URBVENT. Natural ventilation in urban areas-potential assessment and optimal façade design (URBVENT). Retrieved from <https://cordis.europa.eu/project/rcn/54158/factsheet/en>
- Velux. (n.d.). No TitleVelux. Indoor generation. Retrieved from <https://www.velux.com/indoorgeneration>
- Venticool. (2018). Venticool. The international platform for ventilative cooling. Retrieved March 22, 2017, from <http://venticool.eu/>
- Ventilative Cooling Design Guide Energy in Buildings and Communities Programme. (2018).
- VERYSCHOOL.EU - Valuable Energy for a smart school. (n.d.). Retrieved May 2, 2016, from <http://www.veryschool.eu/>
- Wang, J., Wang, S., Zhang, T., & Battaglia, F. (2017). Assessment of single-sided natural ventilation driven by buoyancy forces through variable window configurations. *Energy and Buildings*, 139, 762–779. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.070>
- Wang, Y., Zhao, F. Y., Kuckelkorn, J., Li, X. H., & Wang, H. Q. (2014). Indoor air environment and night cooling energy efficiency of a southern German passive public school building operated by the heat recovery air conditioning unit. *Energy and Buildings*, 81, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.008>
- Wang, Y., Zhao, F. Y., Kuckelkorn, J., Liu, D., Liu, L. Q., & Pan, X. C. (2014). Cooling energy efficiency and classroom air environment of a school building operated by the heat recovery air conditioning unit. *Energy*, 64, 991–1001. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.066>
- Wargocki, P., & Wyon, D. P. (2013). Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be. *Building and Environment*, 59, 581–589. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.007>
- WHO. (2010). *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. (World Health Organization 2010, Ed.). <https://doi.org/10.1186/2041-1480-2-S2-11>
- WHO Europe. (n.d.). *WHO: Air Quality Guidelines. Global update 2005*.
- WHO Regional Office for Europe. (2015). *School environment: policies and current status*.
- WindowMaster: Natural Ventilation and Smoke Ventilation. (n.d.). Retrieved March 22, 2017, from <http://www.windowmaster.com/>
- Windowmaster. (n.d.). Retrieved from <https://www.windowmaster.com/>

- Wong, N. H., & Khoo, S. S. (2003). Thermal comfort in classrooms in the tropics. *Energy and Buildings*, 35(4), 337–351. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00109-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00109-3)
- Wu, M. H., Ng, T. S., & Skitmore, M. R. (2016). Sustainable building envelope design by considering energy cost and occupant satisfaction. *Energy for Sustainable Development*, 31, 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.12.003>
- www.scopus.com. (n.d.).
- Xiao-Yu Maa, Yue Penga, Fu-Yun Zhaoa, \*, Cheng-Wei Liua, S.-J. M. (2017). Full Numerical Investigations on the Wind Driven Natural Ventilation: Cross Ventilation and Single-sided Ventilation. *Procedia Engineering*, 205, 3797–3803. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.128>
- Yang, D., & Li, P. (2015). Dimensionless design approach, applicability and energy performance of stack-based hybrid ventilation for multi-story buildings. *Energy*, 93, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.115>
- Yang, J., Zhou, B., Jin, M., Wang, J., & Xiong, F. (2016). A novel complex air supply model for indoor air quality control via the occupant micro-environment demand ventilation, 89, 474–484. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2016.02.014>
- Yousefi, F., Gholipour, Y., & Yan, W. (2017). A study of the impact of occupant behaviors on energy performance of building envelopes using occupants' data. *Energy & Buildings*, 148, 182–198. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.085>
- Yu, T., Heiselberg, P., Lei, B., Pomianowski, M., & Zhang, C. (2015). A novel system solution for cooling and ventilation in office buildings: A review of applied technologies and a case study. *Energy and Buildings*, 90, 142–155. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.057>
- Yusoff, W. F. M., Salleh, E., Adam, N. M., Sapian, A. R., & Yusof Sulaiman, M. (2010). Enhancement of stack ventilation in hot and humid climate using a combination of roof solar collector and vertical stack. *Building and Environment*, 45(10), 2296–2308. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.018>
- ZEMEDS. (n.d.). Promoting renovation of schools in a Mediterranean climate up to nearly Zero-energy buildings | ZEMEDS. Retrieved May 2, 2016, from <http://www.zemedes.eu/>

## Capítulo 4

- AENOR. UNE-EN 13779 Ventilación de edificios no residenciales. Requisitos de prestaciones de los sistemas de ventilación y acondicionamiento de recintos (2005).
- Agencia Andaluza de la Energía. (n.d.). AMT-A.
- Agencia Andaluza de la Energía. (2008). Solicitud de Documento Reconocido Zonificación Climática de Andalucía por Municipios para su uso en el Código Técnico de la Edificación en su sección de Ahorro de Energía apartado de Limitación de Demanda Energética (CTE-HE1).
- Almeida, R. M. S. F., Ramos, N. M. M., & Freitas, V. P. De. (2016). Thermal comfort models and pupils' perception in free-running school buildings of a mild climate country. *Energy & Buildings*, 111, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.066>
- American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers. ASHRAE STANDARD 55-2004. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 2004 § (2004).
- Andalucía, J. de. Ley 17/2007, de 10 de diciembre, de Educación de Andalucía.
- ANSES. (n.d.). Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.
- ANSES. (2011). Opinion of the ANSES concerning changes in the method used to determine indoor air guideline values (IAGVs). French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES).
- ANSES. (2014). Proposition de valeurs guides de qualité d'air intérieur. L'acétaldéhyde. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES).
- ASHRAE. ASHRAE STANDARD 62.1 (Ventilación para una Calidad Aceptable de Aire Interior), 2007 § (2009).
- Associations, A., Brelih, N., & Goeders, G. (2012). Healthvent Final report.
- Barbadilla-Martín, E., Manuel, J., Lissén, S., Martín, J. G., Aparicio-ruiz, P., & Brotas, L. (2017). Field study on adaptive thermal comfort in mixed mode office buildings in southwestern area of Spain. *Building and Environment*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.042>
- Becerra, J. A., Lizana, J., Gil, M., Barrios-padura, A., Blondeau, P., & Chacartegui, R. (2020). Identification of potential indoor air pollutants in schools, 242. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118420>
- Campano, M. Á. (2015). Confort térmico y eficiencia energética en espacios con alta carga interna climatizados: aplicación a espacios docentes no universitarios en Andalucía.
- CEJA. (n.d.). Consejería de Educación y Deporte. Centros. Retrieved from <http://www.juntadeandalucia.es/educacion/portals/web/ced/centros>
- CIBSE. (2013). TM52. The limits of thermal comfort: avoiding overheating in European buildings. TM 52 CIBSE. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Circulaire du 9 août modifiée relative à la révision du règlement sanitaire départemental type (RSDT). Numéro complémentaire du 13 septembre 1978 (1978). Journal Officiel de la République Française (JORF).
- Comisión Europea. (2010). Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios. Boletín Oficial, L135, 13–35.
- Comisión Europea. (2018). Directiva (UE) 2018/844 por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética. Diario Oficial de La Unión Europea, 156, 75–91.
- Commission, E. (1997). Total Volatile Organic Compounds (TVOC) in Indoor Air Quality Investigation. Report no 19. European Commission. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1997.00002.x>
- Consejería de Educación y Ciencia. Junta de Andalucía. Spain. Orden de 24 de enero de 2003 por la que se aprueban las "Normas de Diseño y Constructivas para los edificios de uso docente" (2003).
- Consejería de Educación y Ciencia. Junta de Andalucía, Consejería de Educación y Ciencia. Junta de Andalucía. Spain, & Consejería de Educación y Ciencia. Junta de Andalucía. Normas de Diseño y Constructivas para los edificios de uso docente. (2003). Spain. Junta de Andalucía.
- Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Ministerio de Fomento. (n.d.). CTE (Código Técnico de la Edificación). Retrieved from <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-ahorro-energia.html>
- Dear, R. De, Kim, J., Candido, C., Deuble, M., Dear, R. De, Kim, J., ... Deuble, M. (2017). Adaptive thermal comfort in Australian school classrooms Adaptive thermal comfort in Australian school classrooms. Building Research & Information, 00(3), 1–16. <https://doi.org/10.1080/09613218.2015.991627>
- Decreto-Lei n.º 78. Decreto-Lei n.º 78/2006. Aprova o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE) (2006). Portugal.
- Decreto-Lei n.º 79. Decreto-Lei n.º 79/2006. Aprova o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) (2006). Portugal.
- Department for Education UK. (2016). BB 101 Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools. Department for Education. UK: Department for Education. <https://doi.org/011-2711642>
- Department for Education. (2016). Guidance on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools. Building Bulletin 101. Draft for public consultation. UK. <https://doi.org/011-2711642>
- Department for Education and skills. (2006). Building Bulletin 101 Ventilation of School Buildings. Department for Education and skills. <https://doi.org/011-2711642>
- DEPARTMENT FOR EDUCATION UK. (n.d.). Retrieved from <https://www.gov.uk/government/organisations/department-for-education>
- DOCE Diario Oficial de la Unión Europea. (2012). Directiva 2012/27/UE del parlamento Europeo y del Consejo relativa a la eficiencia energética. Diario Oficial de La Unión Europea, 1–56.
- Educación, M. de. REAL DECRETO 132/2010, de 12 de febrero, por el que se establecen los requisitos mínimos de los centros que impartan las enseñanzas del segundo ciclo de la educación infantil, la educación primaria y la educación secundaria (2010).
- Edurado, (n.d.). SINPHONIE. Schools Indoor Pollution and Health: Observatory Network in Europe. Retrieved from <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC87071>
- European Commission. Directorate for Health and Consumers. (2014). Schools Indoor Pollution & Health Observatory Network in Europe. <https://doi.org/10.2788/95941>
- European Commission. (n.d.). PVSIG. Retrieved from [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html)
- European Commission. (2016). Agreed EU-LCI values. Substances with their established EU-LCI values and summary fact sheets.
- Europeo, E. L. P., Consejo, E. L., & Uni, D. E. L. a. DIRECTIVA 2002/91/CE relativa a la eficiencia energética de los edificios (DEEE), 2002 Directiva § (2003).
- Gil-Baez, M., Barrios-Padura, A., & Molina-Huelva, M. (2017). Natural ventilation systems to enhance sustainability in buildings: a review towards zero energy buildings in schools. In International Conference on Advances in Energy Systems (ASEE17).
- Gobierno de España, M. de T. y A. S., & Decreto, R. (1997). REAL DECRETO 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo. Boletín Oficial Del Estado, (97, 23 de abril), 12918–12926.
- Grupo TEP 130. (n.d.). Estudio comparativo de sistemas de calefacción y climatización en los proyectos de centros docentes en Andalucía, fase I y fase II. Retrieved from <https://grupo.us.es/grupotep130/es/component/content/article/136-contratos/con-10anos/498-estudio-comparativo-de-sistemas-de-calefaccion-y-climatizacion-en-los-proyectos-de-centros-docentes-en-andalucia-fase-i-y-fase-ii>
- Guais, A., Brand, G., Jacquot, L., Karrer, M., Dukan, S., Grévilot, G., ... Schwartz, L. (2011). Toxicity of carbon dioxide: A review. Chemical Research in Toxicology, 24(12), 2061–2070. <https://doi.org/10.1021/tx200220r>
- Innovación, C. de. (n.d.). Agencia Andaluza de la Energía. Radiación solar. Retrieved from



- <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/Radiacion/radiacion1.php>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). (2010). Guía técnica. Condiciones climáticas exteriores de proyecto. Ahorro y eficiencia energética en climatización.
- Jaime Lopez de Asiaín, Rafael González Sandino, José María Cabeza Láinez, Margarita de Luxán García de Diego, Flavio Celis D'Amico, Fernando da Casa Martín, Ernesto Echevarría Valiente, I. de V. R. (1997). Arquitectura y Clima en Andalucía: Manual de Diseño. (Junta de Andalucía. Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Arquitectura y Vivienda, Ed.).
- Jefatura del Estado. Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación (2006).
- Jefatura del Estado. (2012). Ley 38 1999, de Ordenación de la Edificación. Boletín Oficial Del Estado (BOE), 1855, 1–24. [https://doi.org/Ley 24/2013](https://doi.org/Ley%2024/2013), de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico.
- Jefatura del Estado. Ley Orgánica de Educación 8/2013, de 9 de diciembre, para la mejora de la calidad educativa., Boletín Oficial del Estado § (2013).
- JUNTA DE ANDALUCIA. (n.d.). CONSEJERÍA MEDIO AMBIENTE. Retrieved from [www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/)
- Junta de Andalucía, C. A. ganadería pesca y desarrollo sostenible. (n.d.). Calidad del Aire en Andalucía. Medioambiente. Retrieved from <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/menuitem.7e1cf46ddf59bb227a9ebe205510e1ca/?vgnextoid=a6a92e62ea1a3210VgnVCM1000001325e50aRCRD&vgnnextchannel=e339a862d17d4310VgnVCM2000000624e50aRCRD>
- Junta de Andalucía, C. de E. (n.d.). ISE-APAE. Consejería de Educación (Junta de Andalucía). Retrieved from <http://www.iseandalucia.es/web/guest;jsessionid=AA27AEE4573AD33E4D3E89ABF6BE32D9>
- Junta de Andalucía, & Consejería de Agricultura Ganadería Pesca y Desarrollo Sostenible. (n.d.). Medidas de Calidad del Aire. Medioambiente. Retrieved from <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/menuitem.04dc44281e5d53cf8ca78ca731525ea0/?vgnextoid=7e612e07c3dc4010VgnVCM1000000624e50aRCRD&vgnthirdoid=b31fb19c7acf2010VgnVCM1000001625e50aRCRD>
- Liang, H.-H., Lin, T.-P., & Hwang, R.-L. (2012). Linking occupants thermal perception and building thermal performance in naturally ventilated school buildings. *Applied Energy*, 355–363. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.004>
- Madureira, J., Ines, P., Rufo, J., Ramos, E., Barros, H., Teixeira, J. P., & de Oliveira Fernandes, E. (2015). Indoor air quality in schools and its relationship with children's respiratory symptoms. *Atmospheric Environment*, 118, 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.07.028>
- Mandin, C., Bonvallet, N., Kirchner, S., Keirsbulck, M., Alary, R., Cabanes, P. A., ... Rousselle, C. (2009). Development of French indoor air quality guidelines. *Clean - Soil, Air, Water*, 37(6), 494–499. <https://doi.org/10.1002/clen.200900042>
- MAPAMA. (n.d.). SIAR. Retrieved from <http://portal.mapama.gob.es/websiar/Inicio.aspx>
- Medioambiente-Junta Andalucía. (n.d.). Retrieved from [http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/menuitem.7e1cf46ddf59bb227a9ebe205510e1ca/?vgnextoid=f47996f06f245310VgnVCM1000001325e50aRCRD&vgnnextchannel=d869193566a68210VgnVCM10000055011eacRCRD&lr=lang\\_es&vgnsecondoid=0e47897b33b75310VgnVCM](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/menuitem.7e1cf46ddf59bb227a9ebe205510e1ca/?vgnextoid=f47996f06f245310VgnVCM1000001325e50aRCRD&vgnnextchannel=d869193566a68210VgnVCM10000055011eacRCRD&lr=lang_es&vgnsecondoid=0e47897b33b75310VgnVCM)
- Ministerio de Economía y Hacienda, Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, & Ministerio de Economía y Hacienda. Real Decreto 1751/1998, de 31 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) y sus Instrucciones Técnicas Complementarias (ITE) y se crea la Comisión Asesora para las Instalaciones Térmicas de los Edificios, Boe § (1998).
- Ministerio de Fomento. (n.d.-a). CLIMAS REFERENCIA CTE. Retrieved from <https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/20170202-DOC-DB-HE-0-Climas de referencia.pdf>
- Ministerio de Fomento. (n.d.-b). CTE.
- Ministerio de Fomento. DBHS. Documento básico salubridad, 2018 Septiembre § (2017).
- Ministerio de la Presidencia. Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, Real Decreto § (2007). España.
- Ministerio de la Presidencia, & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España. Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, Real Decreto § (2013). España.
- Ministerio de vivienda. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación, Boletín oficial del estado § (2006).
- Nicol, F., & Pagliano, L. (2007). Allowing for thermal comfort in free-running buildings in the new European Standard EN15251. In 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, September 2007, Crete island, Greece.

- NZEB renovation for Mediterranean schools. (n.d.).
- Persily, A., & de Jonge, L. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*, 27(5), 868–879. <https://doi.org/10.1111/ina.12383>
- Portatia no 353-A. Portatia no 353-A/2013. Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). Requisitos de Ventilação e Qualidade do Ar Interior (2013). Portugal.
- Ramallo, O., Wyart, G., Mandin, C., Blondeau, P., Cabanes, P. A., Leclerc, N., ... Redaelli, M. (2015). Association of carbon dioxide with indoor air pollutants and exceedance of health guideline values. Summary of risk assessment. *Building and Environment*, 93(P1), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.018>
- Romana, F., Ianniello, E., & Igor, B. (2013). PMV e PPD and acceptability in naturally ventilated schools. *Building and Environment*, 67, 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.05.013>
- Santamouris, M. (2007). *Advances in passive cooling*. London: Earthscan.
- Schneider, C., & Laiz, C. L. R. (2013). How will climate change modify river flow regimes in Europe? *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 325–339. <https://doi.org/10.5194/hess-17-325-2013>
- Technical University of Denmark. (n.d.). HealthVent. Retrieved from <http://www.healthvent.byg.dtu.dk/>
- Teli, D., James, P. A. B., Jentsch, M. F., Teli, D., James, P. A. B., Jentsch, M. F., ... Jentsch, M. F. (2017). Thermal comfort in naturally ventilated primary school classrooms. *Building Research & Information*, 3218(March). <https://doi.org/10.1080/09613218.2013.773493>
- Trebilcock, M., Soto-Muñoz, J., Yañez, M., & Figueroa-San Martín, R. (2017). The right to comfort: A field study on adaptive thermal comfort in free-running primary schools in Chile. *Building and Environment*, 114, 455–469. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.036>
- Umweltbundesamt. (2018). Guide values for the concentration of specific substances in indoor air.
- WHO. (2010). WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. (World Health Organization 2010, Ed.). <https://doi.org/10.1186/2041-1480-2-S2-11>
- WHO Regional Office for Europe. (2015). School environment: policies and current status.

## Capítulo 5

- AENOR. UNE-EN 13779 Ventilación de edificios no residenciales. Requisitos de prestaciones de los sistemas de ventilación y acondicionamiento de recintos (2005).
- ANSES. (n.d.). Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.
- ANSES. (2011). Opinion of the ANSES concerning changes in the method used to determine indoor air guideline values (IAGVs). French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES).
- ANSES. (2014). Proposition de valeurs guides de qualité d'air intérieur. L'acétaldéhyde. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES).
- ASHRAE. ASHRAE STANDAR 62.1 (Ventilación para una Calidad Aceptable de Aire Interior), 2007 § (2009).
- Awbi, H. B. (1998). Chapter 7-Ventilation. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2, 157–188.
- Becerra, J. A., Lizana, J., Gil, M., Barrios-padura, A., Blondeau, P., & Chacartegui, R. (2020). Identification of potential indoor air pollutants in schools, 242. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118420>
- CIBSE. (n.d.). AM10-tool. Retrieved from <https://www.cibse.org/Knowledge/Design-Tool-for-IAQ-Analysis>
- CIBSE. (2005). AM10 Natural Ventilation in non-domestic buildings. <https://doi.org/10.1002/9781119951773>
- CIBSETM57. (2015). Integrated school design.
- Clements-Croome, D. J., Awbi, H. B., Bako-Biro, Z., Kochhar, N., & Williams, M. (2008). Ventilation rates in schools. *Building and Environment*, 43(3), 362–367. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.018>
- ClimAct. Transition to a low carbon economy in schools. (2017). Retrieved December 15, 2017, from <http://www.climact.net/>
- Congreso, I. V., Energ, E., & Nula, C. (2017). Libro de comunicación y proyectos - IV Congreso de Edificios Energía Casi Nula. IV Congreso Edificios Energía Casi Nula.
- Consejería de Educación y Ciencia. Junta de Andalucía. Normas de Diseño y Constructivas para los edificios de uso docente. (2003). Spain. Junta de Andalucía.
- Decreto-Lei n.o 78. Decreto-Lei n.o 78/2006. Aprova o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE) (2006). Portugal.
- Decreto-Lei n.o 79. Decreto-Lei n.o 79/2006. Aprova o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) (2006). Portugal.
- Department for Education UK. (2016). BB 101 Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools. Department for Education. UK: Department for Education. <https://doi.org/011-2711642>
- Department for Education. (2016). Guidance on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools. Building Bulletin 101. Draft for public consultation. UK. <https://doi.org/011-2711642>
- Department for Education and skills. (2006). Building Bulletin 101 Ventilation of School Buildings. Department for Education and skills. <https://doi.org/011-2711642>
- DesignBuilder Software Ltd - Home. (n.d.). Retrieved April 16, 2017, from <https://www.designbuilder.co.uk/>



- Dias Pereira, L., Raimondo, D., Corgnati, S. P., & Gameiro Da Silva, M. (2014). Energy consumption in schools - A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 911–922. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.010>
- Edurado, K. (n.d.). SINPHONIE. Schools Indoor Pollution and Health: Observatory Network in Europe. Retrieved from <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC87071>
- Edwards, R., Larive, J.-F., Rikeard, D., & Weindorf, W. (2013). Well-to-Tank Version 4 JEC Well-to-Wheels Analysis. <https://doi.org/10.2788/40526>
- EFA. Building Bulletin 101: Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools, Department for Education § (2016). UK: Department for Education. <https://doi.org/011-2711642>
- EnergyPlus | EnergyPlus. (n.d.). Retrieved April 16, 2017, from <https://energyplus.net/>
- European Commission. (2016). Agreed EU-LCI values. Substances with their established EU-LCI values and summary fact sheets.
- Gil-Baez, M., Barrios-Padura, Á., Molina-Huelva, M., & Chacartegui, R. (2017). Natural ventilation systems in 21st-century for near zero energy school buildings. *Energy*, 137, 1186–1200. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.188>
- Gil-Báez, M., Barrios-Padura, Á., Molina-Huelva, M., & Roldán-Vendrell, C. (2017). Natural ventilation systems in Mediterranean schools. A prototype experience in Andalusia as an alternative to mechanical ventilation. In 38th AIVC Conference “Ventilating healthy low-energy buildings”, Nottingham, UK, 13-14 September 2017 (p. 12).
- Gil-Baez, M., Padura, Á., & Huelva, M. (2019). Passive actions in the building envelope to enhance sustainability of schools in a Mediterranean climate. *Energy*, 167, 144–158. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.094>
- Grupo TEP 130. (n.d.). Estudio comparativo de sistemas de calefacción y climatización en los proyectos de centros docentes en Andalucía, fase I y fase II. Retrieved from <https://grupo.us.es/grupotep130/es/component/content/article/136-contratos/con-10anos/498-estudio-comparativo-de-sistemas-de-calefaccion-y-climatizacion-en-los-proyectos-de-centros-docentes-en-andalucia-fase-i-y-fase-ii>
- Heiselberg, P., Bjørn, E., & Nielsen, P. V. (2017). Impact of Open Windows on Room Air Flow and Thermal Comfort Impact of Open Windows on Room Air Flow and Thermal Comfort, 3315(March), 90–100. <https://doi.org/10.1080/14733315.2002.11683625>
- Lizana, J., Serrano-Jimenez, A., Ortiz, C., Becerra, J. A., & Chacartegui, R. (2018). Energy assessment method towards low-carbon energy schools. *Energy*, 159, 310–326. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.147>
- Mandin, C., Bonvallet, N., Kirchner, S., Keirsbulck, M., Alary, R., Cabanes, P. A., ... Rousselle, C. (2009). Development of French indoor air quality guidelines. *Clean - Soil, Air, Water*, 37(6), 494–499. <https://doi.org/10.1002/clen.200900042>
- MINETUR. (2014). Factores de emisión de CO<sub>2</sub> y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España (in Spanish), 16.
- Ministerio de Economía y Hacienda, Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España, & Ministerio de Economía y Hacienda. Real Decreto 1751/1998, de 31 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) y sus Instrucciones Técnicas Complementarias (ITE) y se crea la Comisión Asesora para las Instalaciones Térmicas de los Edificios, Boe § (1998).
- Ministerio de Fomento. (n.d.). Programa LIDER. CÓDIGO TÉCNICO.
- Ministerio de la Presidencia, & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España. Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, Real Decreto § (2013). España.
- Ministerio de vivienda. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación, Boletín oficial del estado § (2006).
- Portatia no 353-A. Portatia no 353-A/2013. Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). Requisitos de Ventilação e Qualidade do Ar Interior (2013). Portugal.
- Ramallo, O., Wyart, G., Mandin, C., Blondeau, P., Cabanes, P. A., Leclerc, N., ... Redaelli, M. (2015). Association of carbon dioxide with indoor air pollutants and exceedance of health guideline values. Summary of risk assessment. *Building and Environment*, 93(P1), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.018>
- Rufo, J. C., Madureira, J., Paciência, I., Aguiar, L., Teixeira, J. P., Moreira, A., ... Fernandes, E. D. O. (2016). Indoor air quality and atopic sensitization in primary schools: A follow-up study. *Porto Biomedical Journal*, 1(4), 142–146. <https://doi.org/10.1016/j.pbj.2016.07.003>
- RV Burke. (n.d.). Programa VISOL. Retrieved from <http://www.rvburke.com/visorlider.html>
- Umweltbundesamt. (2018). Guide values for the concentration of specific substances in indoor air.
- Ventilative Cooling Design Guide Energy in Buildings and Communities Programme. (2018).
- WHO. (2010). WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. (World Health Organization 2010, Ed.). <https://doi.org/10.1186/2041-1480-2-S2-11>

WHO Regional Office for Europe. (2015). School environment: policies and current status.  
Windowmaster. (n.d.). Retrieved from <https://www.windowmaster.com/>

## Capítulo 6

- Agencia Andaluza de la Energía. (2008). Solicitud de Documento Reconocido Zonificación Climática de Andalucía por Municipios para su uso en el Código Técnico de la Edificación en su sección de Ahorro de Energía apartado de Limitación de Demanda Energética (CTE-HE1).
- ANSES. (n.d.). Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.
- ANSES. (2011). Opinion of the ANSES concerning changes in the method used to determine indoor air guideline values (IAGVs). French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES).
- ANSES. (2014). Proposition de valeurs guides de qualité d'air intérieur. L'acétaldéhyde. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES).
- Congreso, I. V., Energ, E., & Nula, C. (2017). Libro de comunicación y proyectos - IV Congreso de Edificios Energía Casi Nula. IV Congreso Edificios Energía Casi Nula.
- Consejería de Empleo, Empresa y Comercio, J. de A. (n.d.). Estrategia Energética de Andalucía 2020. Retrieved from <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/estrategia-andalucia-2020.pdf>
- Decreto-Lei n.º 78. Decreto-Lei n.º 78/2006. Aprova o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE) (2006). Portugal.
- Decreto-Lei n.º 79. Decreto-Lei n.º 79/2006. Aprova o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) (2006). Portugal.
- Department for Education and skills. (2006). Building Bulletin 101 Ventilation of School Buildings. Department for Education and skills. <https://doi.org/011-2711642>
- EFA. Building Bulletin 101: Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools, Department for Education § (2016). UK: Department for Education. <https://doi.org/011-2711642>
- European Commission. (2016). Agreed EU-LCI values. Substances with their established EU-LCI values and summary fact sheets.
- Gil-Báez, M., Barrios-Padura, Á., Molina-Huelva, M., & Roldán-Vendrell, C. (2017). Natural ventilation systems in Mediterranean schools. A prototype experience in Andalusia as an alternative to mechanical ventilation. In 38th AIVC Conference "Ventilating healthy low-energy buildings", Nottingham, UK, 13-14 September 2017 (p. 12).
- Grupo TEP 130. (n.d.). Estudio comparativo de sistemas de calefacción y climatización en los proyectos de centros docentes en Andalucía, fase I y fase II. Retrieved from <https://grupo.us.es/grupotep130/es/component/content/article/136-contratos/con-10anos/498-estudio-comparativo-de-sistemas-de-calefaccion-y-climatizacion-en-los-proyectos-de-centros-docentes-en-andalucia-fase-i-y-fase-ii>
- Junta de Andalucía, C. de E. (n.d.). ISE-APAE. Consejería de Educación (Junta de Andalucía). Retrieved from <http://www.iseandalucia.es/web/guest?sessionId=AA27AEE4573AD33E4D3E89ABF6BE32D9>
- Mandin, C., Bonvallet, N., Kirchner, S., Keirsbulck, M., Alary, R., Cabanes, P. A., ... Rousselle, C. (2009). Development of French indoor air quality guidelines. Clean - Soil, Air, Water, 37(6), 494–499. <https://doi.org/10.1002/clen.200900042>
- Ministerio de la Presidencia, & Ministerio de Industria Energía y Turismo. Gobierno de España. Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, Real Decreto § (2013). España.
- Monodraught: Engineering delivered. Naturally. (n.d.). Retrieved March 22, 2017, from <http://www.monodraught.com/>
- NZEB renovation for Mediterranean schools. (n.d.).
- Portaria no 353-A. Portaria no 353-A/2013. Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). Requisitos de Ventilação e Qualidade do Ar Interior (2013). Portugal.
- Ramallo, O., Wyart, G., Mandin, C., Blondeau, P., Cabanes, P. A., Leclerc, N., ... Redaelli, M. (2015). Association of carbon dioxide with indoor air pollutants and exceedance of health guideline values. Summary of risk assessment. Building and Environment, 93(P1), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.018>
- Umweltbundesamt. (2018). Guide values for the concentration of specific substances in indoor air.
- WHO. (2010). WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. (World Health Organization 2010, Ed.). <https://doi.org/10.1186/2041-1480-2-S2-11>
- Windowmaster. (n.d.). Retrieved from <https://www.windowmaster.com/>

